

Rediseño de productos: de los productos modularizados a la distribución de planta para una familia de productos

Sebastián Lugo Márquez
Físico

Trabajo de grado para optar al título de maestría en ingeniería

Asesor:
Álvaro Guarín
Ingeniero Mecánico
PhD en Diseño y Fabricación en Ingeniería Mecánica

Medellín
Universidad EAFIT
Escuela de ingeniería
2014

Agradecimientos

Quiero agradecer al profesor Emérito Ernst Eder del Royal Military College de Canadá, que reviso parte de mi trabajo, contribuyo de manera importante en esta investigación y valido el trabajo realizado dándome mucha seguridad para continuarlo y concluirlo. Al profesor de la Universidad EAFIT Sergio Aristizabal por apoyarme con todo el tema de DFA, metodología en la cual es experto. Al especialista en rediseño de productos y compañero de maestría Oliver Rubio que me asesoro cuando tenía que escribir textos en inglés. Y por supuesto quiero agradecer a mi asesor.

Quiero agradecer profundamente a mi hermana que revisó cada palabra que escribí y me hizo las correcciones pertinentes para que este trabajo fuera muy agradable de leer. A mi padre que siempre me presto sus oídos e hizo el papel de asesor escucha y faltando 3 semanas para entregar este documento me hizo voltear todo el texto para darle más claridad... Y lo logramos. A mi madre que como siempre está ahí acompañándome y tolerando mi malgenio cuando estoy estresado. Y por último quiero agradecer a mi querida Naty que logró hacer que toda mi vida fuera más fácil y placentera para poderme dedicar al cien por cien a escribir este documento.

A todos y todas muchas gracias por contribuir de manera importante en este trabajo.

Resumen

Esta investigación pretende evidenciar como el rediseño de un producto, específicamente el rediseño modular, puede generar cambios en la distribución de planta incrementando los niveles de producción de una empresa. Dicho incremento se logró implementando una nueva metodología, que será ampliamente descrita en este trabajo, y que contempla todo el proceso del rediseño de productos, desde el desensamble hasta la distribución de la planta. Para esta investigación se utilizaron herramientas conocidas como el Análisis Funcional, la Matriz de Interacción, El Diseño para el Ensamble (DFA), el Diagrama de Operaciones y algunos conceptos de la gestión de plataforma de un producto modular.

Como ejemplo ilustrativo, se rediseñaron dos productos ya existentes, una licuadora SAMURAI modelo FACICLIC negra y un procesador de alimentos HAMILTON BEACH modelo 70740, los cuales sirvieron de base para evidenciar cómo al transformar un producto en uno más modular se mejora significativamente la distribución de planta, logrando un incremento en la producción de éste, al tiempo que se reducen los tiempos de ensamble y se optimiza la disposición de los puestos de trabajo en la planta para conformar el producto final.

Para llevar a cabo esta investigación, fue indispensable crear una nueva ruta metodológica que nos permitiera rediseñar un producto inicial como un producto modularizado y terminar con el rediseño de la distribución de planta de una familia de productos modulares. Esta nueva ruta metodológica, que hace parte de nuestros resultados de investigación, consta de tres fases. La primera fase, se basa principalmente en modularizar cada uno de los productos que se quieren integrar dentro de la familia de productos, la segunda fase, logra identificar los módulos comunes entre los productos modularizados para generar la plataforma, y por último, la fase tres genera una nueva distribución de planta para el ensamble de la familia de productos generada.

Esta investigación constata, entre otras cosas, como el rediseño modular de productos es una herramienta fundamental en el planteamiento de una familia de productos en una empresa. Partiendo de productos que ya pasaron por un proceso de modularización previo, se propuso una métrica que permite definir la similitud entre módulos, considerando la mayor cantidad de sus propiedades, la forma física y la función de cada uno de ellos, complementando así la metodología propuesta por Katja Hölttä en su tesis doctoral. Finalmente se propuso una distribución de planta que permite un ensamble más eficiente tanto en tiempo como en número de operarios necesarios para la producción, incrementando así la versatilidad y las tasas de producción de la empresa.

Palabras claves: Modularidad, diseño para el ensamble (DFA), Rediseño de productos, herramientas DFX

Índice

1. Introducción	11
2. Marco teórico de referencia: Modularizar en función del ensamble y la generación de una familia de productos.....	14
2.1 Herramientas para el rediseño modular de productos	15
2.1.1 Análisis funcional	15
2.1.2 Diseño para el ensamble (DFA).....	17
2.1.3 Modularidad.....	19
2.1.4 DFA en función de la matriz de interacción	24
2.1.5 Distribución de planta	28
2.1.6 El éxito de la modularización de los productos	31
2.2 Generación de una familia de productos.....	31
2.2.1 Medición de las propiedades de cada uno de los módulos de los diferentes productos.	33
2.2.2 Distancia de similitud entre los módulos.....	35
2.2.3 Comparación de la forma y la función principal de los módulos para escoger los módulos que conformaran la plataforma de productos	38
2.2.4 Diseño de planta para una familia de productos	39
2.2.5 Análisis de eficiencia en las distribuciones de planta	40
2.3 Ruta para el rediseño modular de productos y la generación de familias de productos.	40
2.3.1 Primera fase: del producto inicial a un producto modularizado y la redistribución de planta para su producción.	41
2.3.2 Segunda fase: del producto modularizado a la plataforma de productos.	43
2.3.3 Tercera fase: de la plataforma de productos al rediseño de planta para una familia de productos.....	44
3. Rediseño de productos: de los productos modularizados a la familia de productos.....	46
3.1 Primera fase de productos modularizados: de los productos iniciales a los productos modularizados y a la distribución de planta para su producción.	47
3.1.1 Etapa de análisis del producto inicial.	47
3.1.1.1 Desensamble de los productos iniciales.....	47
3.1.1.2 Clasificación de piezas tipo A y eficiencia de diseño.....	49
3.1.1.3 Análisis Funcional y diagrama funcional de los productos iniciales.....	50
3.1.1.4 Matriz de interacción	51
3.1.1.5 Diagrama de operaciones	54
3.1.1.6 Medición de los tiempos de ensamble y cálculo de la eficiencia de ensamble	59
3.1.2 Etapa creativa: Proceso de modularización con DFA.	59
3.1.2.1 DFA en función de la matriz de interacción	60
3.1.2.2 Modificaciones al desensamble y al ensamble después de modularizar	69
3.1.2.2.1 Medición de tiempos de ensamble antes y después de la modularización	74
3.1.2.2.2 Eficiencia de diseño y eficiencia de ensamble	78
3.1.2.2.3 Diagrama de operaciones después de modularizar	78
3.1.2.3 Distribución de planta en el proceso de ensamble.....	81

3.1.3 Etapa comparativa: después del proceso de modularización.....	84
3.2 Segunda fase para la generación de familia de productos: De los módulos rediseñados a la plataforma de productos.	86
3.2.1 Etapa de medición para obtener el nivel de similitud entre módulos	87
3.2.2 Etapa de comparación entre módulos: elección de módulos similares.	92
3.2.2.1 Distancia de similitud entre los módulos	93
3.2.2.2 Comparación de la forma y la función principal de los módulos para escoger los módulos que conformaran la plataforma de productos.....	95
3.2.3 Etapa creativa: generación de la plataforma de productos, al elegir los módulos comunes.....	99
3.2.3.1 Análisis de la distancia, de la comparación visual y la función	99
3.2.3.2 Toma de decisiones y diseño de módulos comunes	101
4. A modo de conclusiones.....	101
4.1 Tercera fase: redistribución de planta para una familia de productos.	101
4.1.1 Diseño de áreas de ensamble	102
4.1.2 Análisis comparativo de eficiencia por distribución de planta	103
4.2 Discusión.....	105
4.2 Conclusiones generales.....	107
Bibliografía.....	110
Anexos.....	113
Anexo 1. Recomendaciones para la aplicación de la Ruta Metodológica para el rediseño modular de productos y la generación de familias de productos.	113
Anexo 2. Distancias entre módulos con sus respectivas distancias entre medidas para la licuadora y el procesador de alimentos.....	115
Anexo 3. Propuestas de cambios que no se implementaron	117
Anexo 4. Posibilidades de distribuciones de planta para el procesador de alimentos ...	119
Anexo 5. Artículo “Modular redesign methodology for improving plant layout”	121

Índice de figuras

Figura 1. Izquierda Licuadora SAMURAI modelo FACICLIC. Procesador de alimentos HAMILTON BEACH modelo 70740.....	12
Figura 2. Esquema general de un análisis funcional, diagrama funcional del producto.....	17
Figura 3. Matriz de interacción para un producto de tres módulos.	23
Figura 4. Comparación de modularidad entre dos productos de tres módulos.	24
Figura 5. Ejemplo del intercambio de filas en un producto con tres módulos.	25
Figura 6. Matriz de interacción modularizada de un producto de 3 módulos.	26
Figura 7. Preguntas para la Clasificación de Piezas tipo A.....	28
Figura 8. Diagrama de operaciones para un producto con tres módulos iniciales.	30
Figura 9. Diagrama de operaciones para un producto de tres módulos después de modularizar.....	30
Figura 10. Gráfica de barras de las distancias de similitud entre módulos.	37
Figura 11. Dendrograma para la distancia entre módulos de dos productos.....	38
Figura 12. Esquema de la fase 1. Producto modularizado	42
Figura 13. Esquema de la fase 2. Generar familia de productos	44
Figura 14. Esquema de la fase 3. Redistribución de planta.....	45
Figura 15. Esquema general de relación entre fases para el rediseño modular	46
Figura 16. Etapa de análisis del producto inicial (Fase 1).	47
Figura 17. Desensamble de la licuadora.	48
Figura 18. Desensamble del procesador de alimentos.	49
Figura 19. Lista de piezas tipo A de la licuadora.	50
Figura 20. Lista de piezas tipo A del procesador de alimentos	50
Figura 21. Diagrama funcional de la licuadora.	51
Figura 22. Diagrama funcional del procesador de alimentos.	51
Figura 23. Matriz de interacción para la licuadora.	52
Figura 24. Vista en explosión de la jarra de la licuadora.	53
Figura 25. Matriz de interacción para el procesador de alimentos	54
Figura 26. Diagrama de operaciones para la jarra de la licuadora.....	55
Figura 27. Diagrama de operaciones de la base de la licuadora antes de modularizar	56
Figura 28. Diagrama de operaciones para la jarra del procesador de alimentos.	57
Figura 29. Diagrama de operaciones de la base del procesador de alimentos antes de modularizar.....	58
Figura 30. Etapa creativa (Fase 1)	60
Figura 31. Cambio realizado en los empaques laterales del motor (29)	62
Figura 32. Eliminación de piezas para la licuadora y el procesador de alimentos.	63
Figura 33. Propuesta de rediseño para la tarjeta de velocidades del procesador de alimentos.	64
Figura 34. Matriz de interacciones después de realizar cambios en la licuadora	64

Figura 35. Matriz de interacciones después de realizar cambios en el procesador de alimentos	65
Figura 36. Cambio realizado para disminuir las interacciones entre módulos de la jarra de la licuadora.	67
Figura 37. Módulos resultantes después de modularizar	69
Figura 38. Módulos resultantes después de modularizar	70
Figura 39. Matriz de interacciones después de modularizar la licuadora.	71
Figura 40. Matriz de interacciones después de modularizar el procesador de alimentos. ...	72
Figura 41. Comparación simplificada de las matrices antes y después de modularizar la licuadora.	73
Figura 42. Comparación simplificada de las matrices antes y después de modularizar el procesador de alimentos.	73
Figura 43. Comparación de interacciones entre módulos para la licuadora.	74
Figura 44. Comparación de interacciones entre módulos para el procesador de alimentos.	74
Figura 45. Diagrama de operaciones de la licuadora después de modularizar	79
Figura 46. Diagrama de operaciones del procesador de alimentos después de modularizar	80
Figura 47. Distribución de planta para la licuadora antes (“m”) y después (“M”) de modularizar	82
Figura 48. Distribución de planta para el procesador de alimentos antes (“m”) y después (“M”) de modularizar.	83
Figura 49. Etapa comparativa (Fase 1)	84
Figura 50. Eficiencia de diseño antes y después de modularizar.	85
Figura 51. Eficiencia de diseño antes y después de modularizar.	85
Figura 52. Eficiencia de ensamble antes y después de modularizar	85
Figura 53. Eficiencia de ensamble antes y después de modularizar.	85
Figura 54. Etapa de medición (Fase 2).....	87
Figura 55. Modelo escogido para calcular el trabajo realizado en la rotación de la perilla de velocidades de ambos productos.	89
Figura 56. Etapa de comparación entre módulos. Fase 2	92
Figura 57. Matriz de distancias entre los diferentes módulos rediseñados	94
Figura 58. Esquema de barras de distancias entre módulos	94
Figura 59. Dendrograma para los módulos elegidos para evaluar su similitud	95
Figura 60. Etapa creativa (Fase 2)	99
Figura 61. Diseño de áreas de ensamble (Fase 3).....	102
Figura 62. Análisis comparativo de eficiencia por distribuciones de planta (Fase 3).	103
Figura 63. Distribución de planta para la familia de productos	105
Figura 64. Dependencia del índice SMI con el orden de la matriz.....	107
Figura 65. Comparación del motor de la licuadora con una propuesta de cambio que no se implemento	117
Figura 66. Comparación de una parte de la base con una propuesta de cambio que no se implemento	117

Figura 67. Comparación de una parte de la base con una propuesta de cambio que no se implemento	118
---	-----

Índice de tablas

Tabla 1. Traducción propia de las Clases de función, Funciones básicas y sinónimos.	16
Tabla 2. Modularidad basada en la función.	20
Tabla 3. Modularidad basada en el ensamble	21
Tabla 4. Esquemas y matriz de interacción de tres configuraciones diferentes de productos.	22
Tabla 5. Simbología empleada en el diagrama de operaciones	29
Tabla 6. Medidas de las variables de los módulos por producto	35
Tabla 7. Distancia de similitud.	36
Tabla 8. Matriz de distancias entre módulos del producto k y el producto l	37
Tabla 9. Comparación de la forma y la función principal del módulo l y el módulo k	39
Tabla 10. Medidas para determinar la eficiencia de la distribución de planta.	40
Tabla 11. Piezas de la licuadora que interactúan más de una vez por fuera de su módulo ..	61
Tabla 12. Piezas del procesador de alimentos que interactúan más de una vez por fuera de su módulo	61
Tabla 13. Identificación de las interacciones para la licuadora	66
Tabla 14. Identificación de las interacciones entre módulos para el procesador de alimentos	66
Tabla 15. Función por módulo de la licuadora	69
Tabla 16. Función por modulo del procesador de alimentos	69
Tabla 17. Tiempos de ensamble por módulo para la licuadora.	75
Tabla 18. Tiempo de ensamble para la parte eléctrica de la licuadora.	75
Tabla 19. Tiempos de ensamble por módulo para el procesador de alimentos	76
Tabla 20. Tiempo de ensamble para la parte eléctrica del procesador de alimentos.	76
Tabla 21. Reducciones de tiempos de ensamble y de ensamble total para la licuadora modularizada.	77
Tabla 22. Reducciones de tiempos de ensamble y de ensamble total para el procesador de alimentos modularizado.	78
Tabla 23. Análisis de eficiencia después de modularizar la licuadora	85
Tabla 24. Análisis de eficiencia después de modularizar el procesadores de alimentos.	85
Tabla 25. Potencia eléctrica del motor de la licuadora	88
Tabla 26. Potencia eléctrica del motor del Procesador de alimentos	88
Tabla 27. Energía necesaria para accionar la licuadora	89
Tabla 28. Energía necesaria para accionar el procesador de alimentos	89
Tabla 29. Propiedades de los módulos rediseñados de la licuadora	91
Tabla 30. Propiedades de los módulos rediseñados del procesador de alimentos	92
Tabla 31. Distancia de similitud entre M^1_1 y M^2_1	93
Tabla 32. Comparación de forma, peso, volumen y función principal de M^1_5 y M^2_5	96
Tabla 33. Comparación de forma, peso, volumen y función principal de M^1_1 y M^2_1	96
Tabla 34. Comparación de forma, peso, volumen y función principal de M^1_3 y M^2_3	97

Tabla 35. Comparación de forma, peso, volumen y función principal de M^1_4 y M^2_2	97
Tabla 36. Comparación de forma, peso, volumen y función principal de M^1_3 y M^2_2	98
Tabla 37. Comparación de forma, peso, volumen y función principal de M^1_4 y M^2_4	98
Tabla 38. Eficiencia de la distribución de planta para la licuadora	104
Tabla 39. . Eficiencia de la distribución de planta para el procesador de alimentos	104
Tabla 40. . Eficiencia de ensamble para los módulos M^1_4 y M^2_4	104
Tabla 41. Posibilidades en la distribución de planta para el procesador de alimentos antes de modularizar.	119
Tabla 42. Posibilidades en la distribución de planta para el procesador de alimentos después de modularizar.	120

1. Introducción

Es evidente que en la contemporaneidad la tecnología cambia rápidamente (Pedroza Zapata & Ortiz Cantú, 2008). A parte de que cada vez salen al mercado más productos, estos pierden vigencia, cambia su valor en el mercado y pueden rápidamente disminuir sus márgenes de utilidad volviéndose, incluso obsoletos e inservibles (Nonaka, 2007). La introducción de nuevos productos al mercado es cada vez más difícil debido a la competencia, a las tendencias de la moda, a la escasez de implementación de tecnologías apropiadas y a la complejidad de la legislación. Por otro lado, históricamente la mayoría de las industrias han ofrecido productos con ciclos de vida más cortos, mientras los consumidores exigen productos de mayor calidad y con más garantías.

Para atender a las necesidades de los clientes es necesario que las empresas tengan plantas de producción organizadas y flexibles (Vokurka & O'Leary-Kelly, 2000). Es decir, de acuerdo a los productos que se desean sacar al mercado, la empresa debe tener posibilidades de hacer cambios en sus procesos de manufactura y ensamble, e incluso en la distribución de planta. Para facilitar la organización y flexibilidad empresarial, el diseño modular de los productos es fundamental, ya que desde la concepción del producto se está pensando en cómo será la distribución de la planta de producción. En el caso del rediseño de productos la redefinición modular del producto original permite mejorar la distribución de una planta que ya esté en funcionamiento, disminuyendo los tiempos de ensamble, de manufactura y haciendo que ésta sea más flexible, para así poder desarrollar una gran variedad de productos a menor costo y en tiempos de entrega más cortos (Gupta, 2013).

Debido a que los mercados mundiales son cada vez más segmentados, la arquitectura modular de los productos está siendo implementada para los nuevos diseños de productos en un número creciente de empresas (Daniilidis, Enßlin, Katharina, & Lindemann, 2011). Esto conlleva a que los módulos comunes de una familia de productos promuevan la compra de altos volúmenes del mismo material, lo que trae consigo las ventajas de las economías de escala. Por otro lado, la arquitectura modular brinda la posibilidad de adaptar los productos a diferentes mercados, al tener algunos módulos como módulos variantes, y vale la pena resaltar, que cuando se trabaja de manera modular, los módulos son fácilmente desensamblables, reciclables y reutilizables (Erixon, 1996, pág. 358).

El presente trabajo de investigación pretende, obedeciendo una elección de marco teórico de referencia y de herramientas de rediseño para X, evidenciar cómo al transformar un producto original en un producto más modular mejora la distribución de planta y se obtiene mayor capacidad productiva, reduciendo los tiempos de ensamble y optimizando la disposición de los puestos de trabajo en la planta. Para lograr esto se tomó como ejemplo ilustrativo dos productos ya existentes, una licuadora SAMURAI modelo FACICLIC negra (Figura 1 izquierda) y un procesador de alimentos HAMILTON BEACH modelo 70740 (Figura 1 derecha).

En primer lugar, se realizó un estudio previo de los productos originales con los siguientes pasos: desensamblaje completo de los productos, análisis funcional (Otto & Wood, 2001), estructuración de la matriz de interacciones (Huang & Kusiak, 1998), medición de los

tiempos de ensamble y realización del diagrama de operaciones (García Criollo, 2000). Posterior a dicho estudio, se implementaron cambios para lograr un producto más modular, teniendo en cuenta siempre la ensamblabilidad y la funcionabilidad del producto. Dichos cambios se realizaron a través de una manipulación específica de la matriz de interacción que utiliza la metodología de DFA (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002) y de Lucas (Lucas Engineering & Systems Ltd; University of Hull, 1989) para validarlos. Finalmente, se construyó una distribución de planta modular creando “pequeñas fábricas dentro de fábricas” (Ericsson & Erixon, 2000, pág. 102) en donde los módulos se subensamblaron de manera independiente para luego juntarlos en el producto completo, lo que permitirá a la empresa “reducir la complejidad interna, incrementar la flexibilidad y crear una organización proactiva”¹ (Ericsson & Erixon, 2000, pág. 93), logrando incrementar su rentabilidad y reducir los tiempos de ensamble.



Figura 1. Izquierda Licuadora SAMURAI modelo FACICLIC. Procesador de alimentos HAMILTON BEACH modelo 70740. Fotos propias

Después de que estos productos pasaron por el proceso de modularización, se obtuvo como resultado que cada uno de los módulos, no solo estuvieran bien definido, sino que las interacciones entre cada uno de ellos fueran mínimas. Esto se logró utilizando la matriz de interacción de Chun-Che Huang y Andrew Kusiak expuesta en su artículo *Modularity in Design of Products and Systems*, la cual fue una herramienta fundamental para evidenciar las interacciones entre las piezas y entre los módulos (Huang & Kusiak, 1998), el desensamble de los productos y DFA (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002). Vale la pena

¹ Traducción Propia

destacar, que el proceso de modularización también fue fundamental para la conformación de la familia de productos.

La familia de productos entre estos dos electrodomésticos se obtuvo encontrando una distancia de similitud entre cada uno de los módulos como lo explica Katja Hölttä en su artículo de 2003 *Modularizing product architectures using dendrograms*. Dicha “distancia” se obtuvo midiendo las entradas y las salidas de energía, información y materia, propiedades propuestas por la misma autora que se ajustan a ambos electrodomésticos (Hölttä, Tang, & Seering, 2003). Adicionalmente, se midieron propiedades como el volumen, el peso, el número de componentes, el tiempo de ensamble de cada módulo y el número de interacciones entre módulos, para un total de 13 propiedades que lograron dar una información más precisa sobre la distancia entre los módulos. De forma complementaria a esta “distancia de similitud” se comparó la forma y la función principal, lo que permitió, en el caso de nuestro trabajo, aclarar la información al momento de tomar decisiones sobre la similitud de los módulos. Finalmente, se propuso una distribución de planta para la familia de productos con la plataforma creada que permite a la empresa aprovechar las economías de escala, disminuir los tiempos de ensamble y le da continuidad a la producción, así la cantidad de pedidos difiera entre uno u otro producto.

El presente trabajo está dividido en tres capítulos fundamentales: el primer capítulo, que corresponde al apartado 2, se titula *Marco teórico de referencia: modularizar en función del ensamble y la generación de una familia de productos*, y en él se presentan de manera general las referencias teóricas que permiten constituir las herramientas básicas para el rediseño de un producto modularizado, la generación de familias de productos y el rediseño de planta para su producción: Análisis funcional; Diseño Para el Ensamble (DFA); Modularidad; DFA en función de la Matriz de Interacciones (MI); Plataforma de productos; y Diseño de planta para una familia de productos. Este capítulo termina con la descripción de la ruta para el rediseño modular de productos y la generación de familias de productos. El segundo capítulo, que corresponde al apartado 3, lleva por nombre *Rediseño de productos: de los productos modularizados a la familia de productos*, en él se describen secuencialmente los resultados obtenidos al aplicar las herramientas básicas para el rediseño de un producto, tomando como ejemplo ilustrativo dos productos iniciales: una licuadora SAMURAI modelo FACICLIC negra y un procesador de alimentos HAMILTON BEACH modelo 70740. Por último, el tercer capítulo, que corresponde al apartado 4, se desarrolló a modo de conclusiones y se titula *El rediseño de planta para una familia de productos y otras conclusiones generales*, aquí se presenta el diseño de planta para la familia de productos y el análisis comparativo de eficiencia de tres diseños de planta obtenidos en este trabajo de investigación: distribución de planta del producto original; distribución de planta del producto modularizado y distribución de planta de la familia de productos. Este capítulo además, presenta otras conclusiones generales y algunas recomendaciones a la metodología y a su aplicación para el caso de rediseño modular de productos.

2. Marco teórico de referencia: Modularizar en función del ensamble y la generación de una familia de productos.

Actualmente, nuestra producción industrial se ve influenciada por cambios acelerados en los mercados globales en tensión con las dinámicas de consumo. El cambio excesivamente rápido de la tecnología (Pedroza Zapata & Ortiz Cantú, 2008) y la invasión de los mercados mundiales debido al incremento de importaciones y exportaciones, sobre todo por el auge de los BRIC (Brasil, Rusia, India y China) por un lado y por otro, la salida cada vez más rápida de productos al mercado, su pérdida de vigencia, el cambio de su valor y la disminución de sus márgenes de utilidad, volviéndose incluso obsoletos e inservibles (Nonaka, 2007), determinan los procesos de manufactura y producción industrial de las empresas competitivas. Lo anterior, por nombrar algunas de las cosas más impactantes, ha llevado a que en los últimos tres años las empresas se preocupen más por crear plataformas de productos² y convertir sus diferentes gamas en familias de productos (Simpson, Jiao, Siddique, & Hölttä-Otto, 2014). Esto les permite aprovechar las economías de escala al producir cada vez más módulos que son comunes, ensamblar y manufacturar de manera más rápida y poder generar identidad en sus familias de productos al tener partes comunes que aumentan la “commonality”³ de la familia (Jiao, Simpson, & Siddique, 2007).

Para esta investigación se utilizó un conjunto de herramientas conocidas con las que se trabaja constantemente en el diseño de productos. Sin embargo, siendo este un proyecto enfocado al rediseño de productos y no al diseño de estos, dichas herramientas se utilizaron con un nuevo enfoque adaptado a nuestra perspectiva. Para entender el producto más objetivamente se utilizó el análisis funcional según lo presenta Kevin Otto y Kristin Wood en el libro *Product Design* (Otto & Wood, 2001, págs. 162-177). La matriz de interacción de Chun-Che Huang y Andrew Kusiak, la cual exponen en su artículo *Modularity in Design of Products and Systems*, fue una herramienta fundamental para evidenciar las interacciones entre las piezas y entre los módulos (Huang & Kusiak, 1998). Para validar los cambios que se realizaron al producto se utilizó, de diseño para X, el DFA de Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst y Winston Knight, que ilustran de manera completa en su libro *Product design for manufacture and Assembly* (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002). El diagrama de operaciones según lo presenta Roberto García Criollo en su libro *Estudio del trabajo: ingeniería de métodos*, facilitó el entendimiento del orden en el que se debía realizar el ensamble (García Criollo, 2000). Por último, la redistribución de la planta de producción de los productos, específicamente la distribución de los puntos de ensamble, se fundamentó en la gestión de plataforma de un producto modular propuesto por Anna Ericsson y Gunnar Erixon en el libro *Controlling Design Variants: Modular Product Platforms* (Ericsson & Erixon, 2000).

² Plataforma de productos se refiere al conjunto de componentes, tecnologías, subsistemas, procesos e interfaces que forman una estructura para desarrollar una serie de productos que permite maximizar la “commonality” y reducir al mínimo las desviaciones de desempeño individual. (Li, Huang, & Newman, 2007)

³ Commonality es un concepto desarrollado por diferentes autores como Zhila Pirmoradi, G. Gary Wang y Timothy W. Simpson para referirse a las partes comunes de varios productos. Este concepto ha permitido evidenciar como el aumento de las partes comunes de diferentes productos genera una mayor estandarización de la línea de productos (Pirmoradi, Wang, & Simpson, 2014) y una reducción en los costos de producción (Cameron & Crawley, 2014).

2.1 Herramientas para el rediseño modular de productos

Las herramientas de diseño para X son herramientas que permiten enfocar el diseño en objetivos muy específicos y en partes específicas del diseño de productos, son herramientas muy eficientes para trabajar ingeniería concurrente⁴ y conforman un entorno ideal para desarrollar productos. Su objetivo incluye mejorar la calidad, reducir los costos, comprender el ciclo de vida y mejorar la imagen social de productos. Entre las muchas herramientas de diseño para X que existen, se pueden nombrar: diseño para el ensamble y la manufactura, diseño para el ambiente, diseño para la calidad, diseño para el control dimensional, diseño para la modularidad, diseño para la logística, diseño para el empaque, y diseño para la robustez. En general, las herramientas de diseño para X están etiquetadas con una X compuesta por dos partes, la primera parte es un segmento del ciclo de vida del producto, como por ejemplo el ensamble, la forma o el almacenamiento, y la segunda es una ejecución de medidas en el segmento específico. Así, diseño para el ensamble lo que busca es la ensamblabilidad de los productos donde la terminación bilidad⁵ se refiere a la facilidad de ensamble ($X = x + bilidad$). En conclusión, el diseño para X es una herramienta para tomar decisiones en el desarrollo de productos que busca la facilidad de hacer algo ($x + bilidad$) en un producto (Huang G. Q., 1996).

En particular, esta investigación aplica dos herramientas de diseño para X: diseño para el ensamble (DFA) y diseño para la modularidad. Las cuales, serán utilizadas y desarrolladas ampliamente en este trabajo de rediseño de productos y serán trabajadas desde una perspectiva que en primer lugar no se analiza el producto completo con el DFA como es habitual, si no partes de él. Además la herramienta que especifica que partes serán intervenidas es la modularidad. En esta metodología no se intervienen los módulos como podría pensarse si no las piezas que están por fuera de los módulos.

2.1.1 Análisis funcional

Para entender el funcionamiento de los productos y conocer la función que cumple cada pieza en función del producto se realiza un diagrama funcional utilizando las denominaciones exactas de las funciones. En nuestro caso utilizaremos las que recomiendan Otto y Wood en su libro *Product Design* (Otto & Wood, 2001, pág. 172). Esto provee un punto de partida para asegurar que “los productos sigan siendo los productos” y que el rediseño modular propuesto no los afecte en su función.

Para el análisis funcional, se requiere en primer lugar, establecer la función del producto e identificar las entradas y las salidas que se dividen solamente en energía, información y materia. Luego se identifican las funciones que transforman las entradas para generar las salidas, utilizando las funciones presentadas en la Tabla 1. A partir de estas funciones se genera un esquema en donde todas las entradas van pasando por cada función para ser

⁴ La ingeniería concurrente es un entorno ideal para el desarrollo de productos. Sus objetivos incluyen mejorara la calidad, reducir costos, incrementar la flexibilidad entre otros. Es un entorno colaborativo multidisciplinario para tener en cuenta todos los factores del diseño de productos (Huang G. Q., 1996).

⁵ Del inglés bility

transformadas, para así al final tener las salidas que representan lo que obtenemos del producto que se está analizando. A este esquema se le llama diagrama funcional del producto (Figura 2), y en él cada función está representando una parte, o un conjunto de partes, del producto que tiene como objetivo transformar la energía, la información o la materia presentes en el producto (Otto & Wood, 2001, págs. 162-177).

Tabla 1. Traducción propia de las Clases de función, Funciones básicas y sinónimos.
Referencia tomada de Otto y Wood para el análisis funcional (Otto & Wood, 2001, pág. 172)⁶

Clase	Función básica	Clase de flujo restringido	Sinónimos
Canal, cause o conductos	Importar		Entrar, recibir, <i>permitir, captar</i>
	Exportar		Descargar, Expulsar, Disponer, Eliminar
	Transferir	Transportar materia	Levantar, mover
		Transmitir energía	Conducir, transmitir
	Guiar	Trasladar	Dirigir, enderezar, conducir
		Rotar	Girar, voltear
		Permitir grados de libertad	Restringir, desbloquear
Soportar	Parar		Aislar, proteger, evitar, escudar, inhibir, tapar
	Estabilizar		Afirmar
	Asegurar		Bloquear, fijar, sujetar, mantener, sostener
	Posicionar		Orientar, alinear, localizar
Conectar	Acoplar		Ensamblar, unir, adjuntar
	Mezclar		Combinar, adicionar, empacar, juntar, agrupar
Bifurcar	Separar		Cambiar, dividir, liberar, despegar, desconectar, desensamblar, sustraer
		Remover materia	Cortar, pulir, lijar, perforar, tornear
	Refinar		Purificar, colar, filtrar, limpiar
	Distribuir		Divergir, dispersar, difuminar, vaciar
	Disipar		Absorber, humedecer, resistir, difuminar
Proveer	Almacenar		Contener, coleccionar, reservar, capturar
	Distribuir		Llenar, reponer, exponer, proveer
	extraer		
Controlar Magnitud	Accionar		Empezar, iniciar
	Regular		Controlar, permitir, evitar, habilitar/deshabilitar, limitar, interrumpir
	Cambiar		Incrementar, disminuir, amplificar, reducir, aumentar, normalizar, multiplicar, nivelar, rectificar, ajustar
	Formar		Compactar, aplastar, formar, comprimir, agujerear
Convertir	Convertir		Transformar, licuar, solidificar, evaporar, condensar, integrar, procesar, diferenciar
Señalizar	Censar		Percibir, reconocer, discernir, chequear, localizar
	Indicar		Marcar
	Mostrar		
	Medir		Calcular

⁶ Las tablas del presente trabajo son elaboración propia. Cuando no lo son se referencian los autores correspondientes.

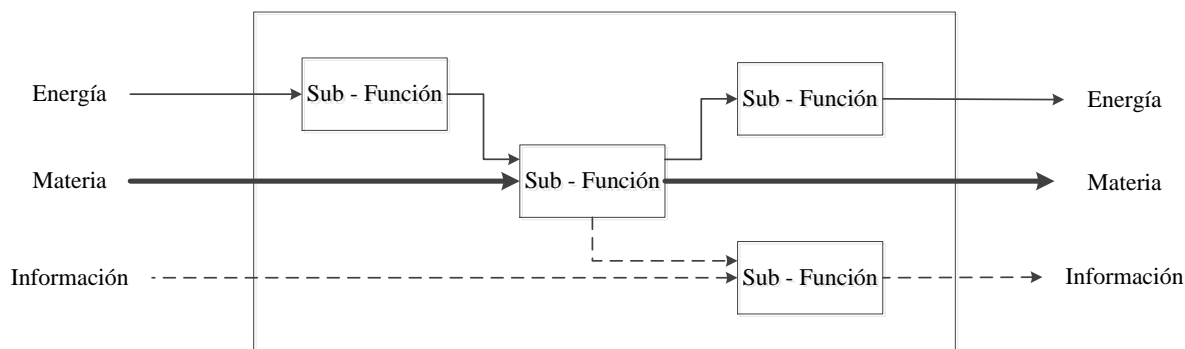


Figura 2. Esquema general de un análisis funcional, diagrama funcional del producto.

Las subfunciones le pertenecen a una parte o a un conjunto de partes del producto y las subfunciones se clasifican según Otto y Wood (Otto & Wood, 2001, pág. 172) ⁷.

El análisis funcional de productos es importante en esta investigación porque fija el producto, permite tener un referente para que el producto siga cumpliendo la función para la que fue diseñado inicialmente y para que los cambios que se presenten en el rediseño no afecten dicha función. Expresado de otra manera, la idea del análisis funcional es lograr que después del rediseño del producto, éste siga prestando el mismo servicio y cumpliendo con la misma función.

2.1.2 Diseño para el ensamble (DFA)

El Diseño para ensamble tiene como objetivo disminuir la complejidad de un producto por medio de la reducción de la cantidad de componentes, eliminándolos o integrándolos. Lo que obtiene como resultado la aceleración de ensamble y la reducción de los costos totales del producto (Boothroyd, 1996). Los beneficios en la reducción del número de componentes son notados de forma inmediata, ya que se evitan órdenes de compra, documentación, materia prima, almacenaje, manejo en planta, pruebas de calidad, servicio, se incrementan las posibilidades de reciclaje, entre otros. Al tener menos componentes para ensamblar, los trabajadores requieren menor uso de herramientas, realizan el trabajo en tiempos más cortos y existe menor riesgo de cometer errores, inclusive el tamaño de la planta puede ser reducido por el espacio que ocuparían las operaciones o el espacio recuperado puede ser utilizado para otras actividades. Además, un análisis de DFA puede ser aplicado para destacar fortalezas y debilidades de productos, incluso de productos no fabricados por la misma compañía, ya que permite obtener un aproximado de los tiempos de fabricación y de ensamble, y de los estándares de calidad utilizados, para proponer mejoras que optimicen su fabricación y en consecuencia, como se ha dicho anteriormente, reducir costos (Andreasen, Kähler, Lund, & Swift, 1988).

Diversos autores como Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, Winston Knigh, Ken Swift y Myrup Andreasen han aportado sus propias recomendaciones para aplicar el diseño para el ensamble (DFA). Para esta investigación se partió de tres libros fundamentales para entender esta herramienta de diseño, *Product Design for Manufacture and Assembly* escrito

⁷ Los diagramas y fotografías del presente trabajo son elaboración propia. Cuando no lo son se referencian los autores correspondientes.

por los tres primeros autores mencionados (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002), *Design for Assembly: practitioners manual* escrito por Lucas Engineering & Systems en donde Ken Swift hizo parte (Lucas Engineering & Systems Ltd; University of Hull, 1989) y *Design for Assembly* de Andreasen (Andreasen, Kähler, Lund, & Swift, 1988). A continuación se presenta una compilación de las recomendaciones propuestas en estos tres libros.

Consideraciones funcionales:

- Minimizar el número de partes (a partes estrictamente funcionales), incorporando funciones múltiples en un sólo componente.
- Implementar ensambles modulares (el mismo componente para varios productos o sub-ensambles)
- Evitar ensamblar componentes en espacios estrechos o con poca accesibilidad, baja visibilidad o con obstáculos para el acceso de las manos, herramienta o componentes.
- Diseñar partes donde se identifique la orientación de inserción (piezas auto orientables).
- Estandarizar partes de la misma clase con el fin de reducir la variedad de componentes.
- Favorecer la fabricación por sub-ensambles.

Consideraciones de manipulación:

- Maximizar la simetría de las partes siempre que sea posible, para facilitar el posicionamiento de las piezas.
- Si no es posible maximizar la simetría hacer la parte altamente asimétrica para evitar las confusiones en el ensamble.
- Eliminar exceso de cableado, mangueras y conexiones.
- Diseñar las partes para fácil identificación o diferenciación.

Consideraciones de inserción:

- Proveer características geométricas de acople o ajuste que faciliten la orientación (piezas auto orientables).
- Agregar características que faciliten la alineación, como chaflanes y redondeos.
- Diseñar considerando el menor número de direcciones de ensamble, preferiblemente vertical hacia abajo.

Consideraciones de ajuste:

- Evitar utilizar elementos de sujeción externos.
- Prever la ubicación de elementos de sujeción en espacios abiertos y de fácil acceso.
- Prever espacios para la fácil utilización de herramientas requeridas.
- Utilizar sistemas de ajuste “Snap fit” o auto sujeción aprovechando las propiedades elásticas de los materiales.

Consideraciones del Proceso de ensamble como proceso:

Adicionalmente, en el estudio del ensamble se debe tener en cuenta el proceso de ensamble en sí mismo y el análisis de las diferentes formas de lograrlo (bien sea manual, semiautomático, automático rígido o automático flexible), así como en el establecimiento de las condiciones del proceso (accesos de los componentes, disposición de los componentes, orden de ensamble o secuencia) y la disposición de los puestos de trabajo⁸.

En síntesis el diseño para el ensamble es una herramienta que logra un producto más fácil de ensamblar en donde no solo se debe tener en cuenta la modificación del producto sino todo lo que está alrededor del proceso de ensamble de este. En esta investigación se utilizaron principalmente la eliminación de piezas y las consideraciones de ensambles modulares debido a los objetivos específicos de nuestro trabajo y a las características de los productos escogidos como ejemplos ilustrativos. No obstante, se recomienda tener todas las recomendaciones en cuenta o definirlas claramente dependiendo de casos particulares.

2.1.3 Modularidad

Trabajar de manera modular o modularizar los productos acarrea muchos beneficios y hace productos y plantas manufactureras más flexibles al poder modificar o mejorar solo un módulo del producto y no el conjunto completo. Es una excelente base para renovar productos o partes de ellos continuamente, al permitir innovar en uno o varios de los módulos sin cambiar el producto. Además, permite desarrollar sistemas de manufactura concurrentes, ya que se puede trabajar de manera paralela en cada uno de los módulos (Erixon, 1996).

Para entender mejor la modularidad se define a continuación que es un módulo y que es en sí la modularidad. Además, se presentan un conjunto de tipos de modularidad que se encuentra en la literatura para terminar de entender este concepto. Por último, se explicará que es y cómo se usa la matriz de interacción ya que es una herramienta muy importante en esta investigación.

Una de las definiciones más simples de módulo es la que propone Anna Ericsson y Gunnar Erixon en su libro *Controlling Design Variants: Modular Product Platforms*, la cual establece que un módulo es un elemento básico o un bloque constructor con interfaces bien definidas (Ericsson & Erixon, 2000, pág. XI). Mientras que Kevin Otto y Cristin Wood definen el módulo desde la representación funcional del producto, llamando módulo al conjunto de funciones compartidas que en conjunto realizan una función principal más importante dentro del producto que las funciones individuales dentro del módulo (Otto & Wood, 2001, págs. 339-345). Otra definición que se presenta en función de las conexiones, fue presentada por Carliss Y. Baldwin y Kim B. Clark en su libro *Design Rules: the power of modularity*, en ella se manifiesta que un módulo es una unidad que tiene elementos estructurales fuertemente conectados entre ellos mismos y que están relativamente conectados de manera más débil con otros elementos en otra unidad u otros módulos (Baldwin & Clark, 2000).

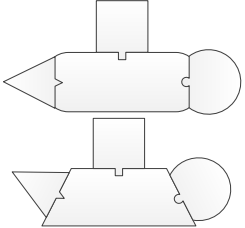
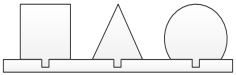
⁸ Los cinco grupos de consideraciones expuestos discutidos y validados con el profesor Sergio Aristizabal de la universidad EAFIT y especialista en DFA.

Para este trabajo, se consensuó como punto de partida, que un módulo debe ser un componente constructor de fácil inserción en un producto, ya que tiene interfaces bien definidas, debe tener fuertes interacciones dentro del módulo, interacciones más débiles entre módulos y debe estar hecho para cumplir una o varias funciones muy concretas. Por su parte, la modularidad⁹, según Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger, es la característica más importante de la arquitectura del producto. Entendiendo la arquitectura como “el esquema por el cual los elementos funcionales del producto están acomodados en trozos físicos y por medio de la cual interactúan los trozos” (Ulrich & Eppinger, 2009, pág. 185). Por tanto la modularidad para Ulrich es una manera de organizar la arquitectura de un producto por medio de trozos interactuantes. El término modularidad también se ha utilizado para describir el uso de unidades comunes y poder crear de una manera más sencilla variantes de un producto al cambiar solamente algunos de sus módulos (Huang & Kusiak, 1998). Así mismo, para Ulrich los productos modulares son subestructuras integrales de un producto físico que tienen correspondencia uno a uno con un subconjunto del modelo funcional de un producto (Otto & Wood, 2001, pág. 361), o como lo dirían Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz, Jörg Feldhusen y Karl-Heinrich Grote “un producto modular puede ser definido por máquinas, ensambles y componentes que cumplen diversas funciones generales a través de la combinación de distintos bloques de construcción o módulos” (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007, pág. 495).

En la literatura se clasifica la modularidad en dos tipos, uno basado en la función y el otro basado en el ensamble, ambas se presentan esquemáticamente en la Tabla 2 y en la Tabla 3. Esta investigación se centró principalmente en la modularidad basada en el ensamble, porque son este tipo de módulos donde la herramienta DFA tiene más que aportar, aunque esto no excluye la utilización de los otros tipos de módulos.

Tabla 2. Modularidad basada en la función.

Referencia tomada del libro *diseño y desarrollo de productos* de Ulrich (Ulrich & Eppinger, 2009, pág. 186 y 187) y del libro *product design* de Otto y Wood (Otto & Wood, 2001, pág. 365)

Modularidad de ranura	En este tipo de productos modulares no hay intercambio de componentes o de módulos entre el mismo producto ya que las interfaces son diferentes, pero si se podrían cambiar uno o más módulos entre diferentes productos	
Modularidad de bus	Los componentes tienen la misma interfaz en el producto pudiendo intercambiar componentes dentro del producto, dichos componentes cumplen diferentes funciones	

⁹ En términos generales, se entenderá en este trabajo que la modularidad es simplemente una característica que tienen productos que pasaron por un proceso de modularización o que fueron diseñados de manera modular, la acción de generar módulos o de modularizar un producto.

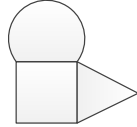
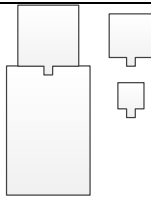
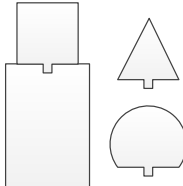
Modularidad Seccional	Todas las interfaces de los módulos son del mismo tipo pero no hay un solo elemento en donde se unan todos los otros módulos, la unión entre los módulos es la que conforma el producto	
Modularidad Mixta	Es parecida a la seccional pero a los elementos o módulos se les puede agregar diferentes tipos de interfaz para poder crear nuevos y diversos productos	

Tabla 3. Modularidad basada en el ensamble

Referencia tomada del libro *product desig* de Otto y Wood (Otto & Wood, 2001, págs. 364-368)

Módulos para el ensamble	Son componentes o grupos de componentes que se ensamblan para cumplir una función necesaria para el funcionamiento del producto pero que son ensamblados antes e incluidos después para incrementar la facilidad de ensamble final de todo el producto	
Modularidad escalable	Consta de componentes que son exactamente el mismo, excepto por su escala física y su diferencia de tamaño hace que su función cambie o sus tolerancias cambien	
Módulos conceptuales	Resuelven las mismas funciones, pero usan principios físicos diferentes	
Modularidad a nivel de componentes intercambiable	Otra forma de ver la modularidad de ranura es como la Modularidad a nivel de componentes intercambiables. En este tipo de modularidad, existe un componente básico, el cual por adición o intercambio de elementos presta diferentes usos	
Elementos de fabricación modular personalizable	Son artefactos que tienen algunos componentes estándares, pero otros son personalizables según las necesidades o gustos del consumidor. Es la base del “MASS CUSTOMIZATION” ¹⁰ que combina los productos únicos de fabricación artesanal con los métodos de fabricación rentable de la producción en masa (Duray, Ward, Milligan, & Berry, 2000)	

Para llevar a cabo la modularización de un producto, en esta investigación se consideró la matriz de interacción y el procedimiento que utilizaron Huan y Kusiak en su artículo de 1998: “la matriz de interacción, $A = [a_{ij}]_{m \times m}$ es una matriz de incidencia componente a componente, donde a_{ij} representa la interacción entre el componente i y el componente j ; i y $j \in C$ ” y $C = \{1, 2, \dots, m\}$ es el conjunto de enteros que representa las piezas del producto las cuales se ubican en la primera fila y en la primera columna de la matriz (Huang & Kusiak, 1998). Esta matriz, que es simétrica, permite ver de una manera completa cuales son las interacciones entre cada una de las piezas.

¹⁰ Fabricación en masa personalizable (Fogliatto, da Silveira, & Borenstein, 2012)

Para crear la matriz de interacción se ubica en la primera columna y en la primera fila los números asignados a las piezas, en orden de desensamblaje, para luego definir cómo cada una de las piezas interactúa con las demás. El contacto entre la pieza i y la pieza j se denota con un *uno* en la casilla que las intersecta. El mapa de *unos* que se crea en la matriz depende del orden en el que se hayan ubicado las piezas en las columnas (o en las filas), debido a esto cuando se desensamble el producto inicial se agrupan las piezas en subensambles. Esta forma de desensamblaje permite visualizar en la matriz los grupos de piezas que más interactúan entre sí (Figura 3) (Steward, 1993).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	m1	1		1				1	
2	1	m1	1		1				
3		1	m1	1				1	
4	1		1	m2	1				1
5		1		1	m2	1		1	
6					1	m3	1	1	
7						1	m3	1	
8	1		1		1	1	1	m3	1
9				1				1	m3

Figura 3. Matriz de interacción para un producto de tres módulos.

La matriz de interacción permite observar no solo las interacciones entre los módulos si no las interacciones dentro de cada uno de los módulos. Los módulos están representados por los cuadros grises y la letra "m" representa los módulos iniciales.

Cada interacción entre las partes representa un "órgano elemental", de acuerdo con el enfoque de Hubka (Hubka & Eder, 1988, págs. 20-22) y cada módulo representa un "grupo de órganos". Cada uno de esos "grupos de órganos" y/o órganos individuales son capaces de realizar una o más acciones, funciones internas del sistema técnico (funciones TS-internas) y/o funciones transfronterizas del sistema técnico (TS) - estas son, por definición, ya sea de "flujo" o "no-flujo" según las funciones propuestas por Otto y Wood (Tabla 1).¹¹ Este enfoque de Hubka permite entender la naturaleza y la existencia de las interacciones. Reconocer las funciones de cada interacción ayuda a realizar el rediseño al igual que entender el funcionamiento del producto, la coordinación entre las distintas partes y la matriz de interacción. Dicho reconocimiento evita errores, fracasos y dificultades potenciales en fabricación.

En conclusión, la matriz de interacción es una herramienta que permite ver las interacciones entre piezas y entre módulos, fácilmente manipulable para modularizar cualquier producto y fundamental en el desarrollo de nuestra investigación.

¹¹ Este párrafo es una contribución del Profesor Emérito Ernst Eder del Royal Military College of Canada, durante el trabajo conjunto para publicación traducido por Sebastián Lugo.

2.1.4 DFA en función de la matriz de interacción

Para este trabajo, La evaluación del producto con DFA (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002) en función de la matriz de interacción se enfocó en eliminar y realinear los *unos* que se encontraban por fuera de los módulos. Según Katja Hölttä, Eun Suk Suh y Olivier De Weck, un producto completamente modular es aquel en el que cada uno de sus módulos interactúa una sola vez con el resto (Hölttä, Suk Suh, & De Weck, 2005). Por tanto, primero se deben disminuir las interacciones que una sola pieza tiene con los diferentes módulos sin contar el módulo al que pertenece, y luego se procede a disminuir las interacciones entre módulos a una sola. Como la eliminación de un *uno* dentro de la matriz de interacción tiene fuertes implicaciones en el producto es importante que cada propuesta de mejora sea validada con DFA, teoría que precisa evaluar los alcances de cada posible cambio en el producto final, manteniendo intactos la funcionalidad y el desempeño de este. Uno de los objetivos de este proceso es volver la matriz de interacciones lo más modular posible y para su realización se siguieron cuatro pasos: identificación de las piezas que tienen interacciones por fuera de su módulo, intercambio de filas, eliminación de piezas y eliminación de interacciones entre módulos (Steward, 1993). Posteriormente, para validar el trabajo que resulta luego de modularizar, se midieron los tiempos de ensamble, el índice de diseño y el índice de ensamble.

Modularizar la matriz de interacción consiste básicamente en lograr que cada uno de los módulos presentados en la matriz interactúen lo mínimo posible entre ellos, así que en función de la matriz de interacción un producto que tenga una representación con pocos unos por fuera de los módulos (Figura 4 izquierda) es más modular comparado con otro, que así tenga las mismas interacciones dentro de los módulos, tenga más interacciones por fuera de ellos (Figura 4 derecha).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	m1	1							
2	1	m1	1		1				
3		1	m1	1					
4			1	m2	1				
5		1		1	m2	1		1	
6					1	m3	1	1	
7					1	m3	1		
8					1	1	1	m3	1
9								1	m3

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	m1	1						1	
2	1	m1	1		1				
3		1	m1	1				1	
4			1	m2	1		1	1	1
5		1		1	m2	1		1	
6					1	m3	1	1	
7				1		1	m3	1	
8	1		1	1	1	1	1	m3	1
9				1				1	m3

Figura 4. Comparación de modularidad entre dos productos de tres módulos.

Los diagramas muestran que aunque las interacciones dentro de los módulos son iguales, el producto de la izquierda es más modular que el de la derecha, ya que tiene menos interacciones entre módulos, menos *unos* por fuera de los cuadros grises.

Para la identificación de las piezas que tienen interacciones por fuera de su módulo, se evalúan las piezas que tienen más de una interacción con el mismo módulo sin contar el módulo al que pertenecen. Este esquema evidencia qué piezas deberían rediseñarse para intentar que cada una tenga como máximo una interacción con los otros módulos. En el ejemplo de la Figura 4 derecha se ve como la pieza 5 tiene dos interacciones con el módulo m3, por lo tanto esta pieza es candidata a ser rediseñada. Luego se procede al intercambio de filas, el cual consiste en determinar cuáles de estas piezas interactúan más por fuera de su módulo que dentro de su propio módulo, para así realizar los cambios apropiados entre las filas de la matriz (y las columnas para mantener la simetría) y reorganizarla de manera que se disminuyan las interacciones entre módulos. Para entender los intercambios de la filas (y de las columnas) se puede utilizar la notación $R_i \xrightarrow{\leftarrow} R_j$ para especificar que la fila i será cambiada por la fila j (y las columnas tendrán el mismo tratamiento para mantener la simetría) (Grossman S., 2008). En el ejemplo de la Figura 4 derecha, la pieza 4 interactúa una vez dentro del módulo 2 mientras que con el módulo 3 interactúa 3 veces así que podría pensarse en un intercambio de filas $R_4 \xrightarrow{\leftarrow} R_5$ y agrandar el módulo m3 como se muestra en la Figura 5.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	m1	1						1	
2	1	m1	1		1				
3		1	m1	1				1	
4			1	m2	1		1	1	1
5		1		1	m2	1		1	
6					1	m3	1	1	
7				1		1	m3	1	
8	1		1	1	1	1	1	m3	1
9				1				1	m3

	1	2	3	5	4	6	7	8	9
1	m1	1						1	
2	1	m1	1	1					
3		1	m1		1			1	
5		1		m2	1	1		1	
4			1	1	m2		1	1	1
6				1		m3	1	1	
7					1	1	m3	1	
8	1		1	1	1	1	1	m3	1
9					1			1	m3

Figura 5. Ejemplo del intercambio de filas en un producto con tres módulos.

En la izquierda se representan las interacciones un producto de tres módulos y en la derecha se muestra como al realizar un intercambio de filas se transforman los módulos del producto.

Es importante recordar que los módulos se escogen según la facilidad de desensamblar, por tanto, la pertenecía al módulo implica un orden específico en el desensamblar. Un cambio en el orden puede implicar desensamblar, y por tanto ensamblar, de manera diferente. Como se expuso anteriormente, el paso tres corresponde a la eliminación de piezas, en este paso se determina cuáles de las piezas que fueron identificadas en el primer paso pueden a ser eliminadas o integradas a otras piezas en ambos productos. Esta eliminación o integración siempre se debe realizar a la luz de DFA y del análisis funcional para lograr que el ensamble sea más fácil y que el producto no pierda su función. Finalmente, se realiza la eliminación de interacciones entre módulos. La simplicidad de las interacciones y la precisa definición de éstas son parte fundamental al modularizar un producto, esto se puede constatar en la definición de módulo de Katja Hölttä en su tesis doctoral, “Un módulo es un

componente independiente de un gran sistema con una función específica e interfaces bien definidas”¹² (Hölttä-Otto, 2005). Por esta razón este paso es fundamental, ya que es el paso final y necesario para obtener una matriz más modular y por tanto un producto más modular. Para la eliminación de interacciones entre módulos, se procede entonces a determinar que módulos interactúan más de una vez, luego de haber hecho los pasos anteriores, e intentar eliminar las interacciones entre módulos teniendo en cuenta el análisis funcional y DFA. Vale la pena recordar que el análisis de las interacciones de las piezas individuales es realizada previamente, en esta sección se tendrán en cuenta solo las interacciones entre los diferentes módulos

Luego de que se implementaron los cuatro pasos mencionados anteriormente, se realiza la creación de nuevos módulos. A partir de un análisis desde el ensamble de los productos, se estudia y se define cómo se pueden combinar algunos módulos para facilitar el ensamble (Figura 6).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	M1	1							
2	1	M1	1		1				
3		1	M1	1					
4			1	M2	1				
5		1		1	M3	1		1	
6					1	M3	1	1	
7						1	M3	1	
8					1	1	1	M3	1
9								1	M3

Figura 6. Matriz de interacción modularizada de un producto de 3 módulos.

Así se debe ver la matriz de interacción para un producto modularizado, con pocas interacciones entre módulos. La letra “M” representa los módulos después de modularizar

Al terminar este proceso, se determina si se evidencia un incremento en la modularidad del producto calculando un porcentaje comparativo que consiste en enumerar las interacciones eliminadas y compararlas con el número de interacciones que se tenían inicialmente (ecuación (1)).

$$\frac{\# \text{ de interacciones eliminadas}}{\# \text{ de interacciones iniciales}} * 100\% \quad (1)$$

Así mismo se puede calcular el índice de modularidad de valor singular (SMI) aplicado a las matrices de interacción antes de aplicar la modularidad y después de aplicar la

¹² Traducción propia

modularidad¹³ u otros índices existentes en la literatura (Hölttä, Suk Suh, & De Weck, 2005).

Paralelamente, para validar los cambios realizados en los productos se miden los tiempos de ensamble en los productos, se estiman las reducciones que los cambios propuestos producen y finalmente se comparan ambos resultados. En nuestros casos de estudio, se estimó un cálculo teórico de los tiempos de ensamble para toda la parte eléctrica basándonos en la teoría de DFA del libro *Product Design For Manufacture and Assembly*, se utilizó el tiempo experimental (EXP) presentado en las gráficas de dicho libro. (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002, págs. 160-162) (Tabla 18 y Tabla 20). Con el fin de evaluar los ajustes que se hacen para que sea más modular el producto, se valoró la reducción del tiempo de ensamble¹⁴.

Además de la medición de los tiempos de ensamble, se sugiere otra forma de evaluación para validar los cambios realizados a los productos por medio de los índices que se obtienen de dos metodologías diferentes de diseño para el ensamble: la eficiencia de diseño de *Lucas Engineering & Systems Ltd* y la eficiencia de ensamble de Boothroyd, Dewhurst y Knight. Ambos índices se deben calcular al producto inicial y al producto modularizado.

La eficiencia de diseño (E_d) está definida como el número de piezas tipo A sobre el número total de piezas, donde el número de piezas tipo A son aquellas indispensables para el correcto funcionamiento del producto y por lo tanto no son susceptibles a cambios (ecuación (2)). Estas piezas se escogen de acuerdo a las preguntas de clasificación de piezas esquematizadas en la Figura 7, la cual muestra un procedimiento en el que fueron combinadas las dos metodologías en un mismo diagrama, con lo que se pretende una clasificación más exacta.

$$E_d = \frac{\# \text{ de piezas tipo A}}{\# \text{ total de piezas}} * 100\% \quad (2)$$

La eficiencia de ensamble (E_e) está determinada por el número de piezas tipo A multiplicada por tres segundos y dividido por el tiempo real de ensamble. Estos tres segundos son un tiempo promedio de ensamble para una pieza que no presenta problemas de manejo, inserción o fijación (ecuación (3)) (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002, pág. 94).

$$E_e = \frac{(\# \text{ de piezas tipo A}) * 3}{t_{\text{real de ensamble}}} * 100\% \quad (3)$$

¹³ Se puede encontrar en la bibliografía que el índice SMI puede ser usado para medir la modularidad (Hölttä-Otto & De Weck, 2007), sin embargo vale la pena aclarar que dicho índice es altamente dependiente del tamaño de la matriz, lo que implica que no puedan compararse dos matrices de diferente tamaño y que entre más grande sean las matrices los valores de SMI siempre tenderán a cero.

¹⁴ Es importante tener en cuenta que si no se tienen los tiempos de ensamble de la fábrica se debe ensamblar varias veces el producto y solo cronometrar en los últimos ensambles para simular la experticia de los operarios que ensamblan muchos productos por día.

Cuando se calculan los índices para la eficiencia de diseño y para la eficiencia de ensamble antes y después de la modularización de ambos productos, se obtiene un % de aumento o disminución de eficiencia. Si la eficiencia de diseño fuese del 100%, tendríamos un producto en el que todas sus piezas son 100% necesarias, y si la eficiencia de ensamble fuese del 100% tendríamos un producto con un proceso de ensamble óptimo. Es por esto, que cualquier aumento en estos dos índices conlleva a un producto más eficiente. Es importante aclarar que debido a que los cambios propuestos están en función de modularizar el producto y no de rediseñarlo desde el ensamble, estos índices podrían aumentarse si se implementara DFA en cada uno de los módulos por separado.

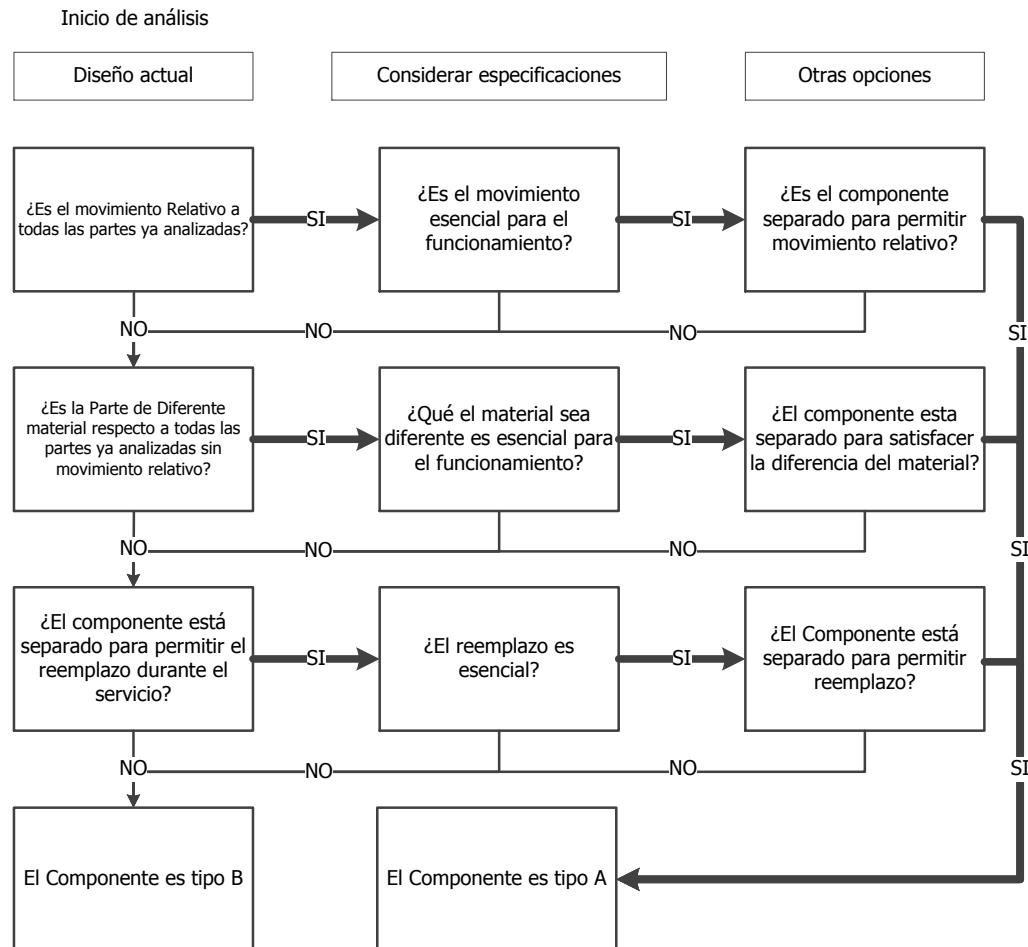


Figura 7. Preguntas para la Clasificación de Piezas tipo A.

El esquema muestra las preguntas de clasificación de piezas tipo A, obtenidas al integrar las preguntas de la metodología de Lucas y las de la metodología de Boothroyd.

2.1.5 Distribución de planta




Para generar la distribución de planta del ensamble del producto se deben conocer cada una de las operaciones que se necesitan para realizar este ensamble y consignarlas en un solo diagrama, este diagrama se llama diagrama de operaciones y se explicará ampliamente a continuación. Es fundamental para poder comparar y saber que los resultados obtenidos

después de modularizar sí son mejoras al producto, realizar el diagrama de operaciones antes de modularizar y tener la distribución de planta antes de modularizar.

Para dar paso a la distribución de planta, se realizó el diagrama de operaciones del ensamble de los dos productos según lo propuesto por Roberto García Criollo en su libro *Estudio del trabajo: ingeniería de métodos*, en el cual se esquematizan las operaciones necesarias para ensamblar el producto (García Criollo, 2000). Estos diagramas están compuestos por cinco símbolos principales de los cuales solo se utilizaron tres para esta investigación, los correspondientes a las operaciones, el almacenaje y el transporte (Tabla 5)¹⁵. Para este trabajo, se tomaron las operaciones como los procedimientos necesarios para que el producto quede ensamblado, el almacenaje como el punto en donde se encuentran las piezas dispuestas para efectuar las operaciones y el transporte como la acción de mover una pieza desde el punto de almacenaje al punto en donde se ensambla el producto¹⁶.

Tabla 5. Simbología empleada en el diagrama de operaciones

Referencia del libro *Estudio del trabajo: ingeniería de métodos* (García Criollo, 2000, pág. 54).

operación	Descripción	Símbolo
Operación	“Ocurre cuando un objeto está siendo cambiado en sus características, se está creando, agregando algo o se está preparando para otra operación”.	
Almacenaje	“Ocurre cuando un objeto o un grupo de ellos son retenidos y protegidos para un posterior uso o para que no hagan mal uso de ellos”	
Transporte	“Ocurre cuando un objeto o un grupo de ellos son movidos de un lugar a otro excepto cuando este movimiento forma parte de otra operación”	

Para construir el diagrama de operaciones se tiene en cuenta el orden en el que los productos son ensamblados, entendiendo que cada pieza empieza siendo almacenada, luego transportada hasta el lugar de ensamble y por último ensamblada por medio de una operación, de esta manera se definen las operaciones. Para clarificar el diagrama de operaciones se puede utilizar un esquema para visualizar el módulo en explosión junto con la numeración de las operaciones necesarias para ensamblar este módulo. La simplicidad del diagrama de operaciones muestra una visión global del ensamble del producto y permite determinar que piezas y que subensambles se pueden ensamblar de manera simultánea. Generalmente, en un proceso de producción se ensamblan subensambles con subensambles previamente ensamblados y no piezas individuales entre sí.

Debido a que el diagrama de operaciones muestra cómo se organizan de manera esquemática las piezas en un orden secuencial de acuerdo al orden de las operaciones de ensamble, es importante observar cómo están distribuidos los módulos dentro de este

¹⁵ Los otros dos símbolos son los correspondientes a puntos de inspección y puntos de demora que tenerlos en cuenta no aporta a esta investigación

¹⁶ El transporte en los ejemplos ilustrativos utilizados en esta investigación, es una distancia de solo algunos centímetros debido a que las piezas no son lo suficientemente grandes para almacenarlas lejos del puesto de trabajo

diagrama encerrando con ovalos las piezas que pertenecen a los módulos. Teniendo en cuenta que en un proceso de ensamble es más eficiente si se ensamblan por separado los módulos (Figura 8), es esto lo que hay que buscar en el proceso de modularización, lo que implica además un nivel más alto de modularidad (Ericsson & Erixon, 2000).

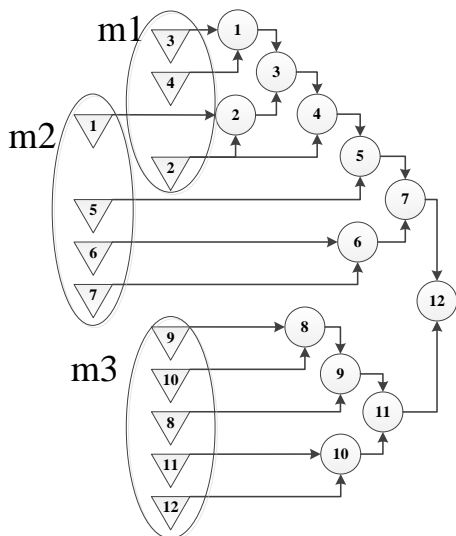


Figura 8. Diagrama de operaciones para un producto con tres módulos iniciales.

Este tipo de esquema muestra de manera muy simple la relación entre las piezas, las operaciones y los desplazamientos por pieza. Así mismo como están agrupadas las piezas en los módulos.

Luego de implementar el proceso de modularización, el diagrama de operaciones debe quedar con módulos muy bien definidos y operaciones que pertenezcan solo a un módulo u operaciones para unir módulos. En el ejemplo de la Figura 8, la operación 2 no se sabe si es del módulo m2 o del módulo m1, es esto lo que se debe resolver con el proceso de modularización. Si la pieza 2, del ejemplo de la Figura 8, fuera eliminable se podría eliminar las operaciones 2 y 4 en el diagrama de operaciones y quedaría como en la Figura 9, un diagrama de operaciones separado claramente por módulos.

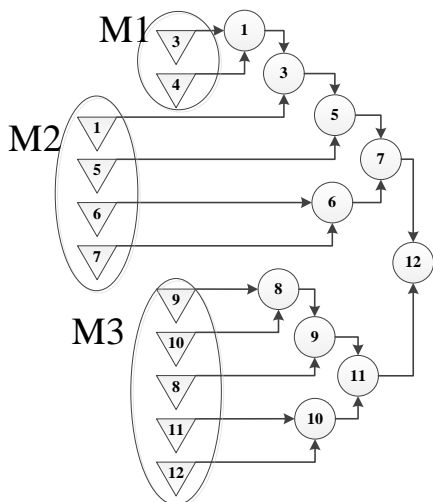


Figura 9. Diagrama de operaciones para un producto de tres módulos después de modularizar. Un diagrama de operaciones separado por módulos facilita la distribución de planta

Luego de tener el diagrama de operaciones es más fácil ver cómo van a quedar los puestos de trabajo y que operaciones se efectuarán en dichos puestos de trabajo. Como los productos quedan separados por módulos, a cada módulo se le puede asignar un puesto de trabajo con el fin de tener “productos dentro del producto, pequeñas fábricas dentro de la fábrica”, así como lo explica Anna Ericsson y Gunnar Erixon en su libro “*Controllin Design Variants: Modular Product Platforms*” (Ericsson & Erixon, 2000, págs. 102-105).

El diseño modular, y específicamente crear módulos en el producto, permite hacer diferentes distribuciones en la planta para seleccionar la mejor opción, ensamblar productos más eficientemente y lograr un mayor incremento en la productividad. Además, El rediseño modular tiene altas implicaciones en la optimización del tiempo de ensamble, el aprovechamiento del área de trabajo, la eliminación de reprocesos, la flexibilidad de la empresa y por tanto en su productividad. Teniendo los módulos ya establecidos, es posible considerar varias formaciones en la distribución de planta y escoger de acuerdo al número de operarios, a los tiempos de desplazamiento, a los tiempos de ensamble de los módulos, entre otras variables importantes, la distribución que más se ajuste a las necesidades de la empresa.

2.1.6 El éxito de la modularización de los productos

Cuando se utilizan las herramientas mencionadas para modularizar un producto se deben tener en cuenta ciertas comparaciones entre el producto antes de modularizar y luego de modularizar para saber hasta qué punto este proceso es o no recomendable. Como se está trabajando desde el diseño para el ensamble el índice de diseño debe aumentar luego de modularizar el producto al igual que el índice del ensamble, ya que estos dos son los principales indicadores del éxito al aplicar esta metodología. Y como una de las recomendaciones importantes del DFA es eliminar o integrar piezas, este proceso de modularización debería lograr que el número de piezas final sea menor que el número de piezas después de modularizar. Sin embargo, si el producto es muy compacto o diseñado de manera integral es muy probable que se tenga que aumentar el número de piezas para lograr la modularización del producto. Teniendo en cuenta para lo que se utilizó y como se utilizó el análisis funcional debemos garantizar además que este análisis antes y después de la modularización sea muy parecido ya que la función y las subfunciones del producto no se pueden modificar. Por otro lado, el diagrama de operaciones debe estar mucho más organizado en un producto modularizado que en uno que no lo este, ya que los módulos que se obtendrán estarán bien definidos. Por último se pueden medir otros índices que existen en la literatura y compararlos antes y después de modularizar para aseverar que la modularización se hizo exitosamente.

2.2 Generación de una familia de productos

Según las publicaciones de Jianxin (Roger) Jiao, Timothy W. Simpson y Zahed Siddique, para conformar una familia de productos se debe lograr que los diferentes constituyentes de la familia tengan componentes, módulos, subsistemas, procesos de fabricación u operaciones de ensamble iguales (Jiao, Simpson, & Siddique, 2007, pág. v). Por otro lado, según Katja Hölttä-Otto una familia de productos consiste básicamente en un conjunto en el que cada uno de los productos tiene uno o más módulos iguales (Hölttä-Otto, 2005). Desde

la modularidad se puede hacer un análisis de las características propuestas por Jiao, Simpson y Siddique en cada módulo, ya que un solo módulo las contiene y es más simple hacer un análisis de menos piezas que de productos completos. Por esto compartimos la idea de que la modularidad es el camino más eficiente para lograr una plataforma, y por supuesto una familia de productos (Herrador, Aguayo González, Lama Ruiz, & del Pozo Madroñal, 2010).

Al ser la modularidad una herramienta tan importante para lograr la plataforma de productos, se pueden escoger varios productos ya rediseñados y modularizados y generar la familia de productos. En nuestro caso, la licuadora SAMURAI fácil clic y el procesador de alimentos HAMILTON BEACH modelo 70740, que se rediseñaron como productos modulares con la metodología propuesta en esta investigación con el fin de lograr que cada módulo tuviera el mínimo número de interacciones posibles entre sí. Para generar la familia de productos se parte de los módulos resultantes después de la modularización, del número de piezas por módulo evidenciado a partir del desensamble y del número de interacciones entre módulos que arrojaron las matrices de interacción realizadas.

Ya que se quiere generar una familia de productos, se puede contar con dos o más productos ya modularizados, y para poder identificar los módulos se debe definir una cantidad M_j^i , en donde i empieza en uno y llega hasta el número de productos que se tengan para generar la familia, que denotaremos por la letra L y j empieza en uno y llega hasta el número de módulos que tenga cada uno de los productos que denotaremos con la letra N , M representa cada uno de los módulos de los productos, i representa los productos y j el número del módulo. Es decir, el superíndice corresponde al número del producto y el subíndice corresponde al número del módulo. Para denotar cantidades que den información de los dos productos simultáneamente, se utilizan dos superíndices y dos subíndices. Por ejemplo, la distancia entre módulos que se explicará más adelante, es una relación entre dos módulos así que se escribirá d_{42}^{13} , lo que quiere decir distancia entre el módulo 4 del producto 1 (M_4^1) y el módulo 2 del producto 3 (M_2^3), el primer subíndice corresponde al módulo del producto que indica el primer superíndice.

Al tener los productos modularizados lo que se busca es identificar cuáles de los módulos pueden ser comunes entre los productos que se están estudiando, y para esto se debe examinar el nivel de similitud entre los módulos. Una forma de medir esta similitud es medir la distancia entre cada uno de los módulos de un producto con los módulos de otro producto, en una sola palabra se mide la commonality entre ambos productos a través de sus módulos (Höltkä-Otto, 2005, pág. 46). La commonality se calcula midiendo específicamente la energía, la información y la materia que entra y que sale de los diferentes módulos y comparando estas entradas entre módulos tal como lo propone Höltkä (Höltkä, Tang, & Seering, 2003) y como se detallará más adelante.

Adicional a esto, a cada módulo se le midió el peso, el volumen, el número de componentes, el número de interacciones con los otros módulos y el tiempo de ensamble de cada módulo, en los tres últimos casos la información se obtuvo del proceso de modularización. Estas medidas adicionales a las que propone Höltkä se hicieron buscando considerar un mayor número de variables para lograr más exactitud en la distancia entre

módulos al tener en cuenta más propiedades de los módulos, la elección de dichas variables adicionales, se realizó considerando su fácil medición y su universalidad en los módulos de cualquier producto.

2.2.1 Medición de las propiedades de cada uno de los módulos de los diferentes productos.

Con el fin de obtener el máximo de información de los módulos para hallar su grado de similitud se requiere medir sus diferentes propiedades. El tipo de propiedades a medir depende de las características de los productos y de los módulos seleccionados. En nuestro caso se seleccionaron las siguientes propiedades y se tuvieron en cuenta las siguientes recomendaciones:

Energía

La energía es una variable física de gran relevancia ya que es necesaria para efectuar un trabajo y hacer funcionar los objetos o parte de ellos, hablando específicamente en los productos se puede manifestar de muchas formas aunque principalmente tenemos energía eléctrica, energía mecánica y electromagnética (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007, pág. 29). Cuando se va a medir la energía que entra y que sale de uno de los módulos se debe considerar hasta qué grado de precisión es importante medir esta energía y buscar las herramientas necesarias para medirla, ya que no siempre se puede con herramientas sencillas. En esta investigación se midió la energía eléctrica, energía cinética rotacional y el trabajo realizado en los módulos por fuerzas externas a ellos.

Información

Según Kevin Otto, la información es todo aquello que permite a un usuario o al mismo sistema tomar decisiones para el funcionamiento de un producto (Otto & Wood, 2001, pág. 164). Esta variable no es siempre fácil de medir lo importante es estandarizar la misma forma de medirla en todos los productos que se vayan a considerar en la generación de la familia de productos. En esta investigación se consideraron como información todos los símbolos, letras, números líneas guías que tienen los módulos para informar cómo debe ser el buen funcionamiento de cada uno de ellos.

Materia

Como lo explica Kevin Otto en su libro *Product Design*, “la materia en general se considera como gases, líquidos, sólidos, polvo, materias primas, muestras, piezas de trabajo, componentes y así sucesivamente” (Otto & Wood, 2001, pág. 164). Según Gerhard Pahl, Wolfgang Beitz, Jörg Feldhusen y Karl-Heinrich Grote en el libro *Engineering Design* la materia “puede ser convertida en variedad de formas. Esta puede ser mezclada, separada, teñida, recubierta, empacada, transportada, reconfigurada y puede cambiar de estado” (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007, pág. 29). En esta investigación para medir la materia que interactúa con los módulos se midió la cantidad de materia que cada módulo podía almacenar o conducir por lo tanto esta expresada en metros cúbicos.

Número de componentes del módulo

Otra variable importante a la hora de definir si un módulo se asemeja a otro es la cantidad de componentes internos del módulo. Aunque casi siempre hay piezas que se pueden

reemplazar, integrar o eliminar, si dos módulos van a ser iguales deben tener un número de piezas iguales.

Volumen del módulo

Para medir la cantidad de espacio que cada módulo ocupa se mide solo la envolvente de los módulos. Esta puede ser medida de dos maneras, con una envolvente cilíndrica o con una envolvente paralelepípeda de ángulos rectos. Si el módulo contaba con una simetría cilíndrica, su envolvente se mide con la misma simetría y si tenía otra simetría se considera la envolvente paralelepípeda.

Número de interacciones del módulo con otros módulos

Cuando se habla de modularidad las interacciones entre módulos son de suma importancia, ya que entre menos interacciones tenga un módulo más modular es el producto (Hölttä, Suk Suh, & De Weck, 2005). Si se van a hacer módulos comunes, también deben tener las mismas interfaces, o sea, la misma forma de relacionarse con el resto de los módulos para conformar el producto. Como los diferentes productos están previamente modularizados, se pueden tener en cuenta las interacciones definidas previamente. Operativamente lo que se hace es contar los *unos* que están por fuera de los módulos en las matrices de interacción que corresponden a ese módulo.

Tiempos de ensamble por módulo

El tiempo de ensamble de cada módulo es determinante para hacer un análisis certero de la distribución de planta, ya que el tiempo del módulo más lento limita el ensamble del producto completo. Como esta información se mide en el producto, se debe tener en cuenta que debe ser medida por módulo y se puede utilizar como otra propiedad más, para así aumentar la cantidad de variables que sirven para medir la distancia entre módulos.

El peso

Esta cantidad es importante para aumentar las variables que se le pueden medir a cualquier módulo existente, de cualquier producto existente, para precisar la distancia entre módulos de productos diferentes.

Se debe tener en cuenta que algunas cantidades como la energía, la información y la materia se deben medir antes de ingresar a los módulos y al salir de los módulos ya que son estas cantidades las que se están transformando mientras el producto está en funcionamiento y por lo tanto al ingresar a un módulo estas cantidades se pueden transformar antes de salir.

Luego de tener todas estas cantidades medidas se recomienda consignarlas en una tabla como la que se muestra a continuación (Tabla 6) donde se tomaron las variables que entran diferentes a las que salen de cada módulo, denotadas con la letra “I” y la letra “O” respectivamente.

Tabla 6 Medidas de las variables de los módulos por producto. Elaboración propia

Producto <i>i</i>	Medidas (m)	M_1^i	M_2^i	M_3^i	M_n^i	Dimensiones
Flujos de Entrada (I)	Energía (IE)					Joules en un s
	Trabajo (IW)					Joules
	Símbolos (IS)					Símbolos
	Materia (IM)					cm ³
Flujos de salidas (O)	Energía (OE)					Joules en un s
	Trabajo (OW)					Joules
	Símbolos (OS)					# Símbolos
	Materia (OM)					cm ³
Propiedades del módulo	# de comp. (#C)					# de comp.
	Peso (P)					g
	Volumen (V)					cm ³
	# de inter. (#I)					# de inter.
	T. de Ensamble (T)					Segundos

2.2.2 Distancia de similitud entre los módulos

Para encontrar la similitud entre los módulos de ambos productos, se define la distancia entre ellos, comparando las medidas (*m*) entre dos variables de dos módulos. Así por ejemplo, se puede comparar la energía de M_4^1 con la energía de M_4^3 calculando su diferencia, y dividiéndolas por la máxima medida de las dos. Esto último, garantiza la adimensionalidad de la cantidad obtenida (ecuación (4)), y es dicha cantidad resultante la que se denomina distancia entre medidas (*d*) (Herrador, Aguayo González, Lama Ruiz, & del Pozo Madroñal, 2010).

$$d_{ij}^{kl} = \frac{m_i^k - m_j^l}{\text{Max}(m_i^k, m_j^l)} \quad (4)$$

Donde *k* y *l* se usan para los productos que se quieren comparar, *i* y *j* se usan para los módulos que se quieren comparar y *d* se denota diferente dependiendo de las medidas (*m*) que se estén evaluando.

Luego se deben relacionar todas estas medidas adimensionales definiendo la distancia entre dos módulos (*D*) como la raíz cuadrada de las distancias entre medidas al cuadrado (Ecuación (5)) de los dos módulos involucrados (Hölttä, Tang, & Seering, 2003).

$$D_{ij}^{kl} = \sqrt{\sum_d (d_{ij}^{kl})^2} \quad (5)$$

Donde la suma se efectúa en cada una de las distancias de un mismo par de módulos, así que la suma va desde la primera distancia hasta la última distancia considerada entre las variables.

La distancia entre medidas (d), que puede definirse como la magnitud que compara las diferentes medidas (m), evidencia si una propiedad determinada es semejante a otra, siempre y cuando ambas propiedades sean diferentes de cero. Cuando dos medidas comparables son iguales a cero no se obtiene información alguna, ya que pueden suceder dos cosas, una que los módulos tengan la misma propiedad con el mismo valor y la otra, que simplemente los módulos no cuenten con esta propiedad, esto quiere decir que dicha propiedad no es una medida de comparación. Cuando algunos de los módulos que son comparados no cuenta con alguna de las propiedades, la distancia d es igual a cero, haciendo parecer dos medidas iguales sin serlo.

La presencia de medidas iguales a cero evidencia que algunas distancias entre módulos (D) puedan ser muy pequeñas así los módulos no sean parecidos, lo que no refleja exactamente la similitud entre los módulos que se están comparando. Para corregir este error, se recomienda adicionar las siguientes propiedades: el número de componentes de cada módulo ($\#C$), el peso (P), el volumen (V), el número de interacciones entre módulos ($\#I$) y el tiempo de ensamble de cada uno de los módulos (T), las cuales se expusieron anteriormente. Estas medidas permiten calcular distancias entre los módulos, más precisas y ajustadas a la realidad.

De esta manera se puede obtener la siguiente tabla que ayuda a visualizar la distancia entre módulos y la distancia entre medidas:

Tabla 7. Distancia de similitud.

Distancia (d) entre medidas (m) y distancia entre módulos (D) del módulo i del producto k con el modulo j del producto l . Elaboración propia

Distancia de similitud	distancia (d)	Valor
Distancia (d) entre medidas (m) del módulo i del producto k con el modulo j del producto l	IE_{ij}^{kl}	
	IW_{ij}^{kl}	
	IS_{ij}^{kl}	
	IM_{ij}^{kl}	
	OE_{ij}^{kl}	
	OW_{ij}^{kl}	
	OS_{ij}^{kl}	
	OM_{ij}^{kl}	
	$\#C_{ij}^{kl}$	
	P_{ij}^{kl}	
	V_{ij}^{kl}	
	$\#I_{ij}^{kl}$	
	T_{ij}^{kl}	
Distancia entre el módulo i del producto k con el modulo j del producto l	D_{ij}^{kl}	

Cuando se obtienen las distancias entre módulos se recomienda organizarlas en una matriz en donde la primera columna corresponde a los módulos de un producto y la primera fila corresponde a los módulos de otro producto como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Matriz de distancias entre módulos del producto k y el producto l .
En este ejemplo el producto k tiene 4 módulos y el producto l tiene 3 módulos.

M	M_1^k	M_2^k	M_3^k	M_4^k
M_1^l	D_{11}^{kl}	D_{12}^{kl}	D_{13}^{kl}	D_{14}^{kl}
M_2^l	D_{21}^{kl}	D_{22}^{kl}	D_{23}^{kl}	D_{24}^{kl}
M_3^l	D_{31}^{kl}	D_{32}^{kl}	D_{33}^{kl}	D_{34}^{kl}

Otras dos formas de organizar estas distancias entre módulos para poder obtener información más fácil es mediante una gráfica de barras, en donde se organicen de menor a mayor las distancias con los respectivos módulos (Figura 10), o en un dendrograma que permita visualizar las relaciones entre dos módulos y la distancia que hay entre ellos. Un dendrograma se construye empezando con dos módulos y conectándolos con una línea horizontal que representa la distancia entre ellos, luego se toman otros dos y se hace el mismo procedimiento si uno de los módulos de la siguiente pareja ya se tuvo en cuenta se debe empezar de la línea horizontal más cercana (Figura 11) (Hölttä, Tang, & Seering, 2003). El objetivo de todas estas distancias es lograr identificar cuáles son los módulos que más se parecen entre sí por lo que se necesita identificar las menores distancias.

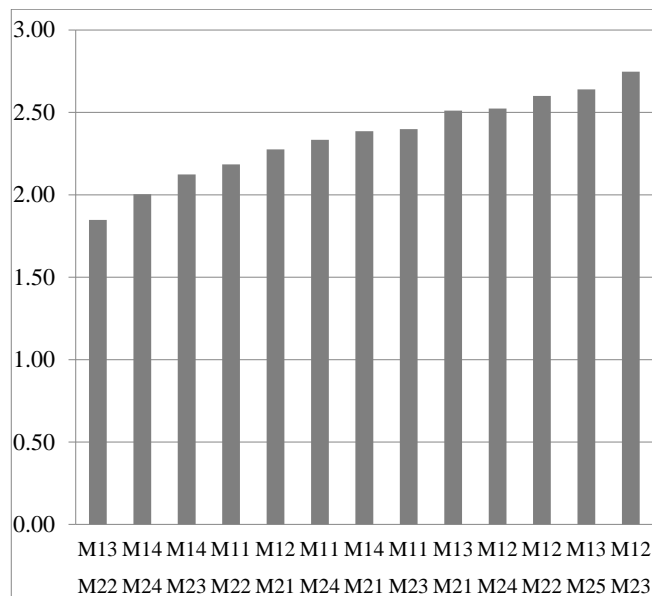


Figura 10. Gráfica de barras de las distancias de similitud entre módulos.
En este ejemplo la distancia de similitud se organiza de manera ascendente

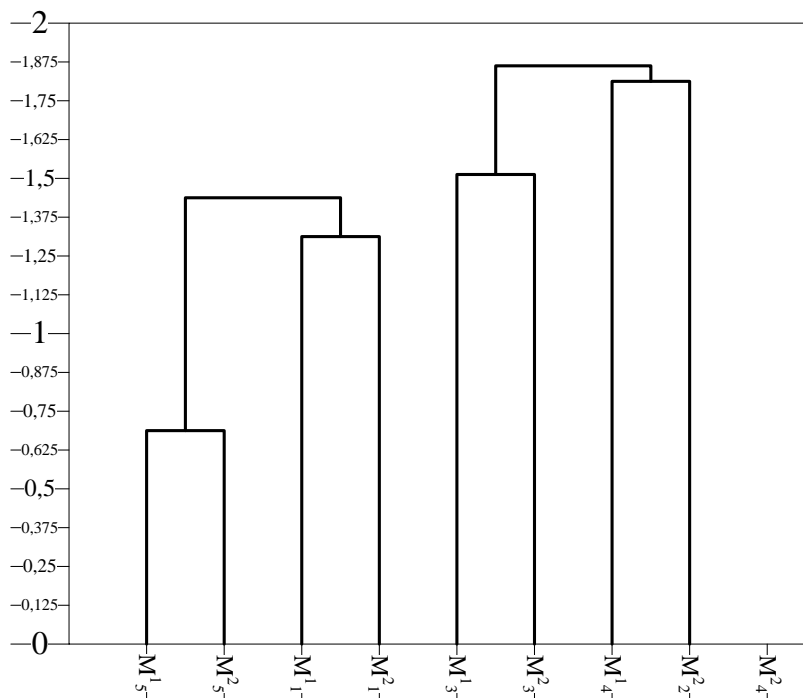


Figura 11. Dendrograma para la distancia entre módulos de dos productos
El dendrograma es una herramienta que permite identificar el grado de similitud entre módulos

A partir de los resultados obtenidos se deben identificar y hacer una selección inicial de los módulos que son candidatos a conformar la familia de productos. Con estas parejas de módulos se procede a analizar su forma y función para tomar la decisión final de cuales van a ser los módulos comunes que conforman la familia de productos, para luego generar la distribución de planta de la familia completa.

2.2.3 Comparación de la forma y la función principal de los módulos para escoger los módulos que conformaran la plataforma de productos

Para que la elección de los módulos que conformaran la familia de productos sea la correcta, se propone comparar la forma y la función principal de los módulos que se escogieron previamente con la distancia entre módulos. La forma en esta investigación se considerará como la imagen, el volumen y el peso del módulo y se recomienda consignar toda la información de la manera esquematizada en la Figura 9. En cuanto a la función principal del módulo se debe identificar en esta sección para poder completar la misma tabla, para esto se recomienda ver las funciones antes mencionadas (Tabla 1). Como se expuso anteriormente, la distancia entre los módulos no es un parámetro de selección suficiente para obtener la similitud entre módulos, pues muchas veces se puede encontrar que entre módulos muy diferentes la ausencia de una propiedad en uno de ellos reduce la distancia de similitud hasta valores cercanos a cero; módulos que no se parecen, pueden obtener distancia pequeña entre ellos.

Tabla 9. Comparación de la forma y la función principal del módulo l y el módulo k . Elaboración propia

M_j^l		M_i^k	
Imagen del módulo		Imagen del módulo	
Peso		Peso	
Volumen		Volumen	
Función		Función	

Con los módulos que presentan menor distancia, después de hacer las correcciones señaladas con las comparaciones anteriores, se puede proceder a hacer iguales a módulos similares. Este punto hace parte de una etapa creativa, ya que las decisiones que se deben tomar dependen de los productos que se estén estudiando y de los módulos que se quieran hacer iguales o para hacer módulos comunes y así generar la familia de productos.

2.2.4 Diseño de planta para una familia de productos

Al tener los módulos comunes queda determinada la plataforma de productos, ya que una plataforma es según Li et al (Li, Huang, & Newman, 2007), un conjunto de componentes, tecnologías, subsistemas, procesos e interfaces que forman una estructura para desarrollar un número de productos que maximicen la comonality entre ellos y minimice la desviación individual en su desarrollo (Pirmoradi, Wang, & Simpson, 2014, pág. 4). Al tener una plataforma, y más precisamente una plataforma modular, lo que sigue a continuación es separar por áreas de ensamble los diferentes módulos, inicialmente los módulos que son comunes a todos los productos y luego los que no. Esto genera como lo explica Anna Ericsson y Gunnar Erixon en su libro “*Controllin Design Variants: Modular Product Platforms*” fabricas dentro de fábricas (Ericsson & Erixon, 2000, págs. 102-105).

Modularizar y crear una familia de productos permite construir la distribución de planta de manera más sencilla, debido a que contar con módulos bien definidos transforma las áreas de trabajo en unas más compactas y más definidas, dando organización y eficiencia al proceso de ensamble. Por otro lado, cuando se cuenta con módulos que constituyen la plataforma se consolidan áreas comunes para los productos de la familia lo que incrementa la versatilidad de la empresa y su eficiencia. De esta manera se pueden obtener áreas compactas según la particularidad de los módulos: plataformas compartidas (ensamblaje de módulos comunes); áreas de trabajo para módulos que son de ensamblaje sucesivo y áreas de trabajo para módulos independientes. Para organizar estas áreas de ensamble también se debe tener en cuenta que cada módulo luego de ser ensamblado debe recorrer el mínimo desplazamiento, logrando así una empresa más eficiente y organizada.

2.2.5 Análisis de eficiencia en las distribuciones de planta

Después de hacer la distribución de áreas de trabajo y rediseñar la planta para una familia de productos, se debe realizar un análisis de eficiencia dentro de la planta productora. Este análisis consiste en evaluar el tiempo que se demora en elaborar un determinado número de productos, el número de operarios que se necesitan para elaborar los productos y las horas de trabajo para el ensamble de módulos y productos por operario, esto con el fin de comparar y organizar las plantas manufactureras antes y después de modularizar los productos y de generar la familia de productos. Además, para identificar los beneficios que trajo todo el proceso de modularizar y la generación de la familia de productos.

Tabla 10. Medidas para determinar la eficiencia de la distribución de planta.

Estas medidas se obtienen teniendo en cuenta una cantidad determinada de productos al día. Elaboración propia

Cuota para el producto l				Horas de trabajo diarias por operario para cumplir la cuota	
Módulos	tiempo de ensamble por modulo	# de módulos diarios con 1 operario	Operarios en Área para cumplir la cuota	horas	min
M_1^l					
M_2^l					
M_3^l					

Al crear esta plataforma de productos y hacer este rediseño de planta para una familia de productos, se pueden obtener diferentes beneficios, entre ellos, se logra que ciertos procesos se realicen de manera más eficiente, se constituye una planta en la que se pueden producir el mismo número de productos con menos operarios y en menos tiempo. Seguramente, en la forma inicial de ensamble, se ensamblaban módulos por separado, que con el rediseño se volvieron un solo módulo. Por lo tanto, es preciso afirmar, que después de crear la plataforma, se necesitarán menos operarios para terminar con la misma cuota de productos en un día. Por otra parte, al crear una familia de productos se puede mantener la planta de producción activa aunque no haya pedidos de uno de los productos, ya que hay módulos que siempre se van a manufacturar y por tanto se obtiene continuidad de operación de planta, pues se desactivan sólo algunas áreas de trabajo. En el área de compras, también se pueden aprovechar las economías de escala, comprando más piezas iguales para los diferentes productos.

2.3 Ruta para el rediseño modular de productos y la generación de familias de productos.

Con todas las herramientas antes mencionadas se puede proponer una ruta para el rediseño de productos que pasa por la modularización de los productos iniciales a considerar, el rediseño de planta para su producción, el diseño de módulos comunes, el diseño de plataformas generando familias de productos y termina con el rediseño de planta para la producción de la nueva familia de productos. Se sugiere a continuación una ruta para el

rediseño modular de productos que explicará de qué manera se deben usar las herramientas mencionadas en el capítulo 2.1 y 2.2.

2.3.1 Primera fase: del producto inicial a un producto modularizado y la redistribución de planta para su producción.

El proceso de rediseño debe iniciar con el desensamble del producto original, tal y como lo proponen las referencias teóricas, que consiste en hacer el desensamble del producto original en procura de una primera modularización. Es decir, buscando la agrupación de piezas de tal forma que faciliten el desensamble de un posible producto modularizado. A este primer agrupamiento de piezas se le denomina módulos iniciales. Esta selección inicial de los módulos del producto puede hacerse utilizando metodologías diferentes como la expuesta por Karl T. Ulrich y Steven D. Eppinger o el modelo heurístico de Otto y Wood, las cuales consisten respectivamente en identificar y esquematizar la arquitectura del producto (Ulrich & Eppinger, 2009, pág. 194 y 195), y seleccionar algunos flujos para nombrar los módulos a través del diagrama funcional (Otto & Wood, 2001, págs. 379-390).

Posteriormente se continúa con la metodología de modularización, la cual es fácil de implementar en cualquier producto, ya que permite analizar el producto desde lo abstracto con la matriz de interacción y el análisis funcional y lo tangible con el DFA. La modularización permite la disminución en los tiempos de ensamble, los costos de fabricación y el aumento de la producción, transforma la planta en una más flexible y ayuda a mejorar los procesos. Es una metodología que necesita pocos recursos y poco tiempo para su elaboración siendo estos últimos puntos importantes si se piensa en los márgenes de tiempos tan limitados con los que cuentan las empresas para lanzar sus productos al mercado y el poco presupuesto destinado para investigación. Es una metodología que permite regresar sobre los pasos ya realizados para hacer cada vez más modular el producto que se está estudiando y permite luego de tener los módulos conformados hacer otro tipo de análisis en cada uno de los módulos, como diseño para la calidad, diseño para el ensamble, diseño para la robustez entre otros diseños para X (DFX)¹⁷ que existen.

Esta primera fase se puede esquematizar con el diagrama de flujo presentado en la Figura 12, en donde las entradas a la fase y a cada una de las etapas están a la izquierda en texto vertical y las salidas están a la derecha con la misma configuración del texto. De esta manera se puede apreciar claramente en que consiste cada etapa dentro de la fase y que operaciones se utilizan para lograr las salidas, obteniendo finalmente, como salida principal de la fase, el producto modularizado y una distribución de planta para dicho producto.

¹⁷ DFX, Design For X

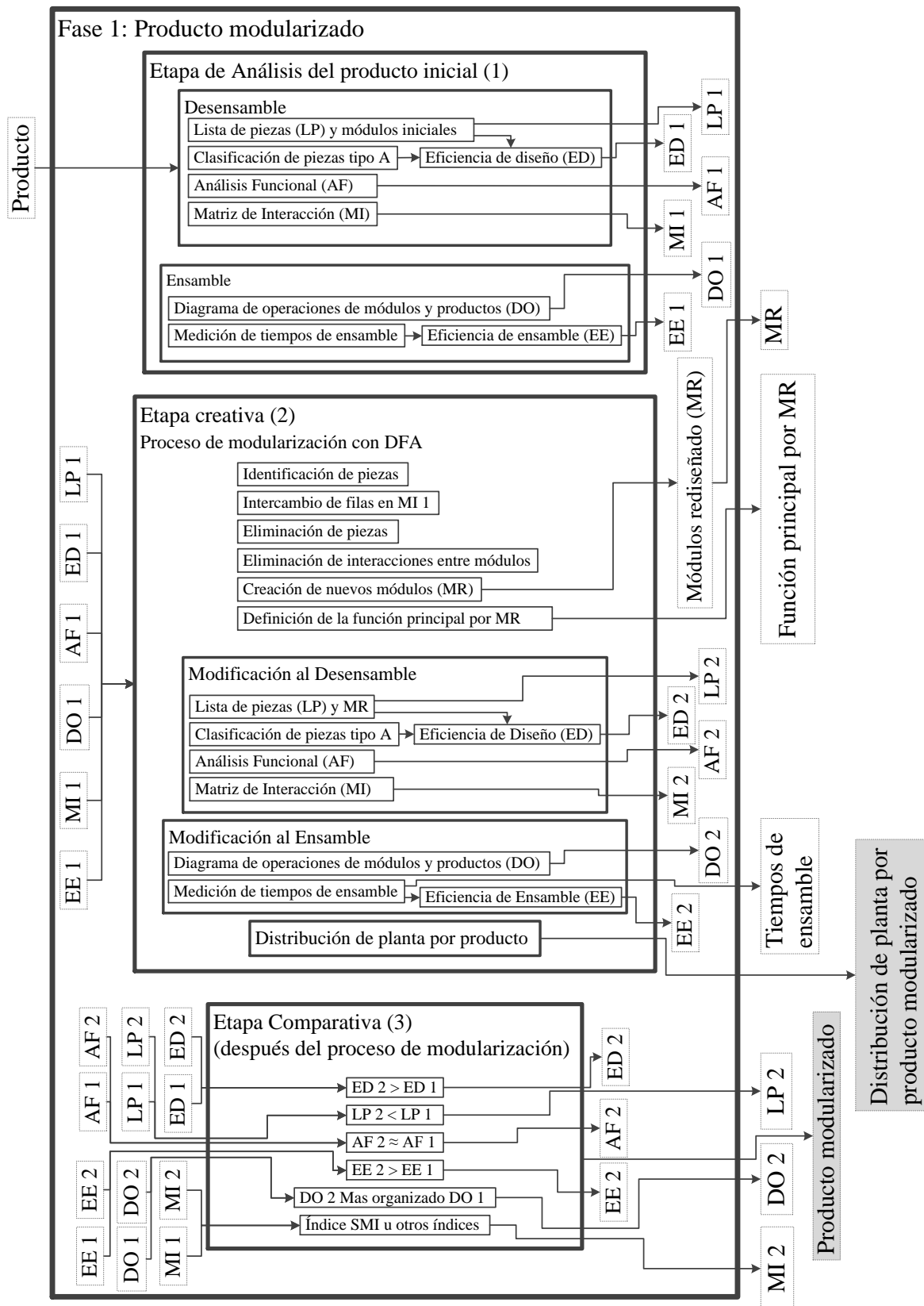


Figura 12. Esquema de la fase 1. Producto modularizado. Elaboración propia

Luego de modularizar de manera individual cada producto inicial, se obtienen como procedimientos resultantes el desensamble y la matriz de interacción. Estos dos procedimientos son fundamentales para la conformación de la familia de productos y la distribución de planta y se desarrollaron ampliamente en este trabajo de investigación. En primer lugar, el desensamble, permite entender el funcionamiento del producto y hacer el primer agrupamiento de las piezas en módulos para dar comienzo al proceso de modularización. Dicho proceso da lugar a la obtención de módulos rediseñados (MR) con los que es posible emprender la segunda fase para generar plataforma de productos. En segundo lugar, las matrices de interacción de ambos productos, permiten estudiar cada una de las interacciones que hay entre las piezas de cada producto, lo que permite obtener módulos de productos con el mínimo número de interacciones entre sí.

2.3.2 Segunda fase: del producto modularizado a la plataforma de productos.

Para esta segunda fase se propone una metodología que permitió generar una plataforma de productos a partir de productos ya modularizados, utilizando los módulos finales de cada uno de los productos e intentando igualar la mayor cantidad de módulos de diferentes productos.

Durante el desarrollo de esta fase, se define la similitud entre los módulos utilizando la distancia entre módulos propuesta por Katja Hölttä en su tesis doctoral (Hölttä-Otto, 2005), la cual plantea el análisis de la energía, la materia y la información que entra y sale a cada uno de los módulos. Como se ha señalado, esta distancia de similitud requiere de correcciones a partir de variables adicionales como el peso, el volumen, el número de componentes, el número de interacciones y el tiempo de ensamble de cada uno de los módulos, las cuales permiten complementar y definir con mayor precisión la similitud entre módulos. Entre más propiedades de cada módulo se consideren más ajustada a la realidad será la distancia entre módulos. Sin embargo, como no está determinado teóricamente cuántas propiedades se deben tener en cuenta para calcular la distancia entre módulos ideal, se propone considerar esta distancia como un primer filtro para escoger los módulos que harán parte de la plataforma final. Debido a que esta metodología parte de un proceso de rediseño y los productos ya están en el punto de venta o en la fase de prototipos, es de suma importancia evaluar la forma, la función principal, el peso y el volumen por separado, esto facilita una definición adecuada de la plataforma. Después de hacer un primer filtro con la distancia entre módulos se consideran las últimas características descritas para igualar los módulos y generar una nueva distribución de planta, lo que permite un ensamble más eficiente, tanto en tiempo como en número de operarios necesarios para la producción, incrementando así la versatilidad y las tasas de producción de la empresa.

Esta segunda fase se puede esquematizar con el diagrama de flujo presentado en la Figura 13, en donde se puede apreciar que las salidas de la fase 1 son las entradas de la fase 2, y donde tenemos como salidas la plataforma de productos y los módulos rediseñados que no fueron escogidos para conformar la plataforma y crear la familia de productos.

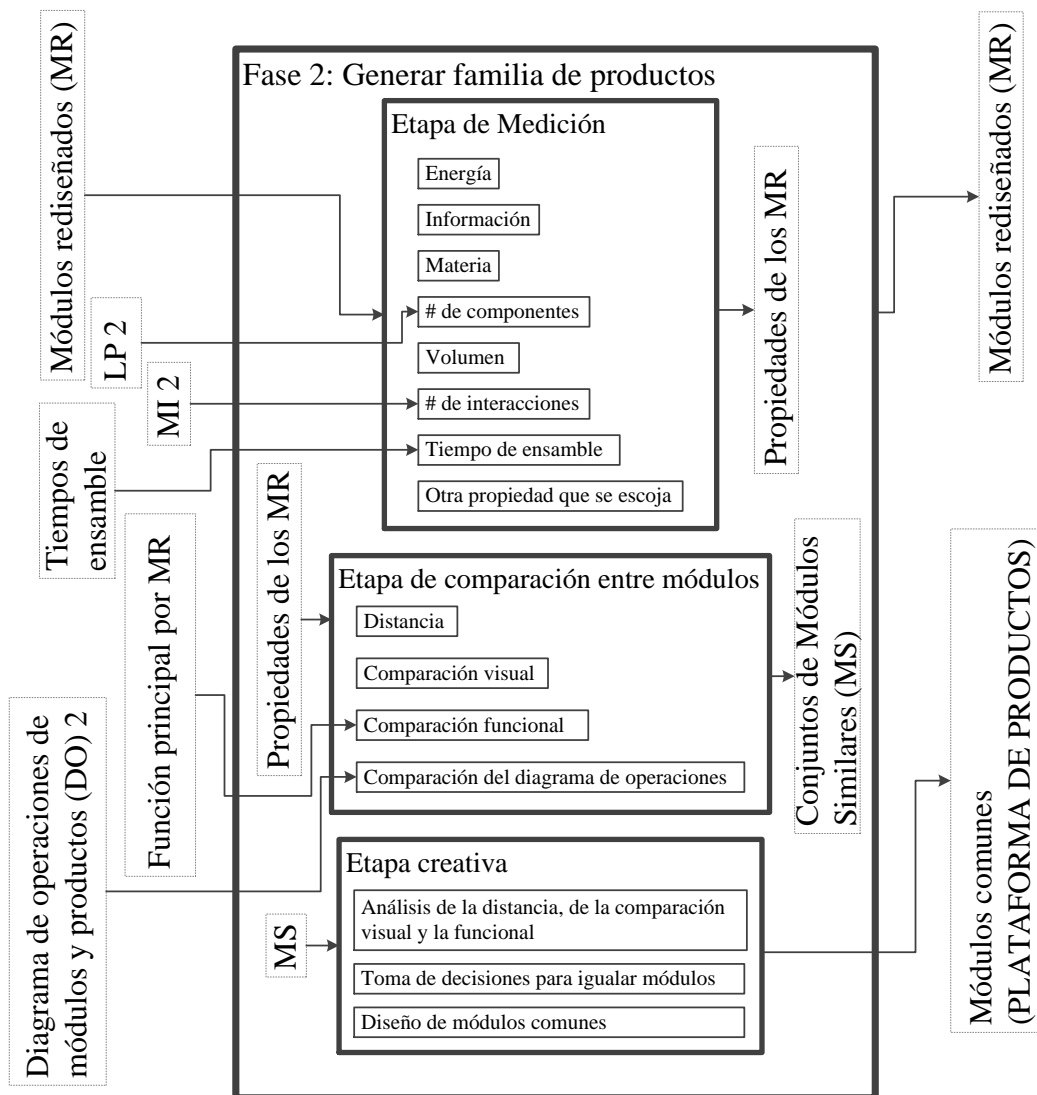


Figura 13. Esquema de la fase 2. Generar familia de productos. Elaboración propia

2.3.3 Tercera fase: de la plataforma de productos al rediseño de planta para una familia de productos.

Después de obtener los módulos rediseñados y la plataforma de productos se puede emprender el trabajo de redefinir las áreas de trabajo según los módulos obtenidos. Esto generará áreas de trabajo más compactas y más definidas, buscando mayor organización y eficiencia del proceso de ensamble. Como se ha detallado, los módulos comunes configuran plataformas de productos y consolidan áreas comunes para una familia de productos, lo que incrementa la versatilidad de la empresa y su eficiencia.

Esta tercera fase se puede esquematizar con el diagrama de flujo presentado en la Figura 14, donde se observa que las entradas son las salidas de la fase 2 y algunas de la fase 1, y como salida final, obtenemos una construcción de planta rediseñada para la familia de productos.

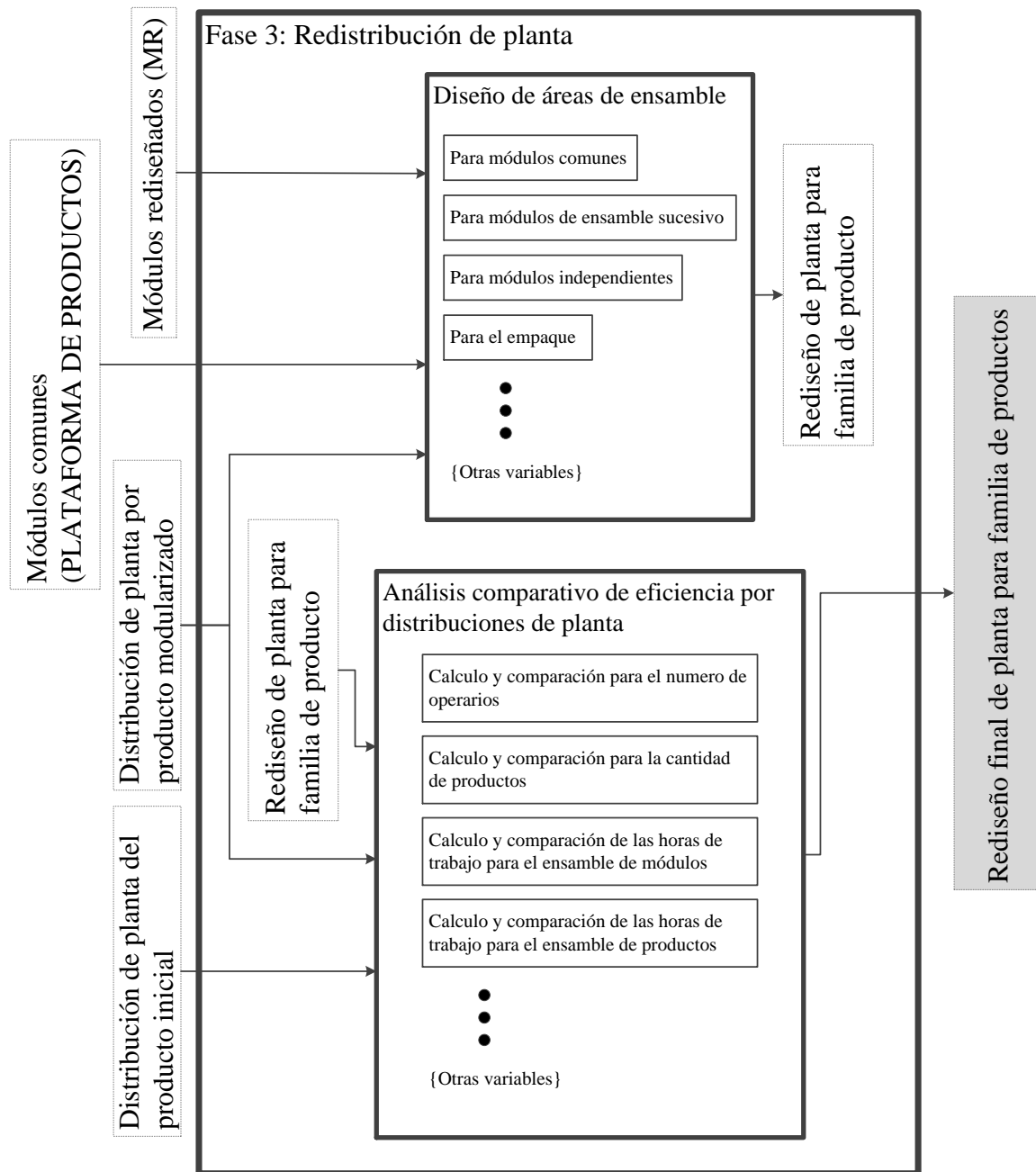


Figura 14. Esquema de la fase 3. Redistribución de planta. Elaboración propia

Es importante aclarar que pedagógicamente y debido al orden procedimental utilizado, estas fases se intentaron proponer de manera lineal pero no es necesario que su implementación sea así. Un mismo producto podría pasar varias veces por el proceso de modularización, así como una familia de productos después de estar en la fase 3 podría regresar a la fase 1, debido a que la distribución de planta como fue diseñada no era funcionalmente posible, por lo tanto habría que volver a modularizar los productos y generar una familia diferente.

3. Rediseño de productos: de los productos modularizados a la familia de productos.

En este capítulo se describen secuencialmente los resultados obtenidos al aplicar las herramientas básicas para el rediseño de un producto descritas en los capítulos anteriores. A modo de ejemplo ilustrativo, se partió de dos productos iniciales: una licuadora SAMURAI modelo FACICLIC negra y un procesador de alimentos HAMILTON BEACH modelo 70740 (Figura 1). La secuencia de aplicación se describe en tres fases las cuales titulamos como sigue, la primera, *Productos modularizados: de los productos iniciales a los productos modularizados y a la distribución de planta para su producción*, la segunda, *Generación de familias de productos: de los módulos rediseñados a la plataforma de productos*, y la tercera, *Redistribución de planta para una familia de productos*. Esta última fase se presentará en el capítulo de conclusiones, ya que los resultados obtenidos en la redistribución de planta final validan toda esta investigación y los consideramos como concluyentes al proceso metodológico propuesto. En el presente capítulo, las primeras dos fases se desglosarán por etapas, y se realizará una descripción detallada de las operaciones y las salidas que se obtuvieron al aplicar las herramientas descritas para el rediseño de productos modularizados (Figura 15).

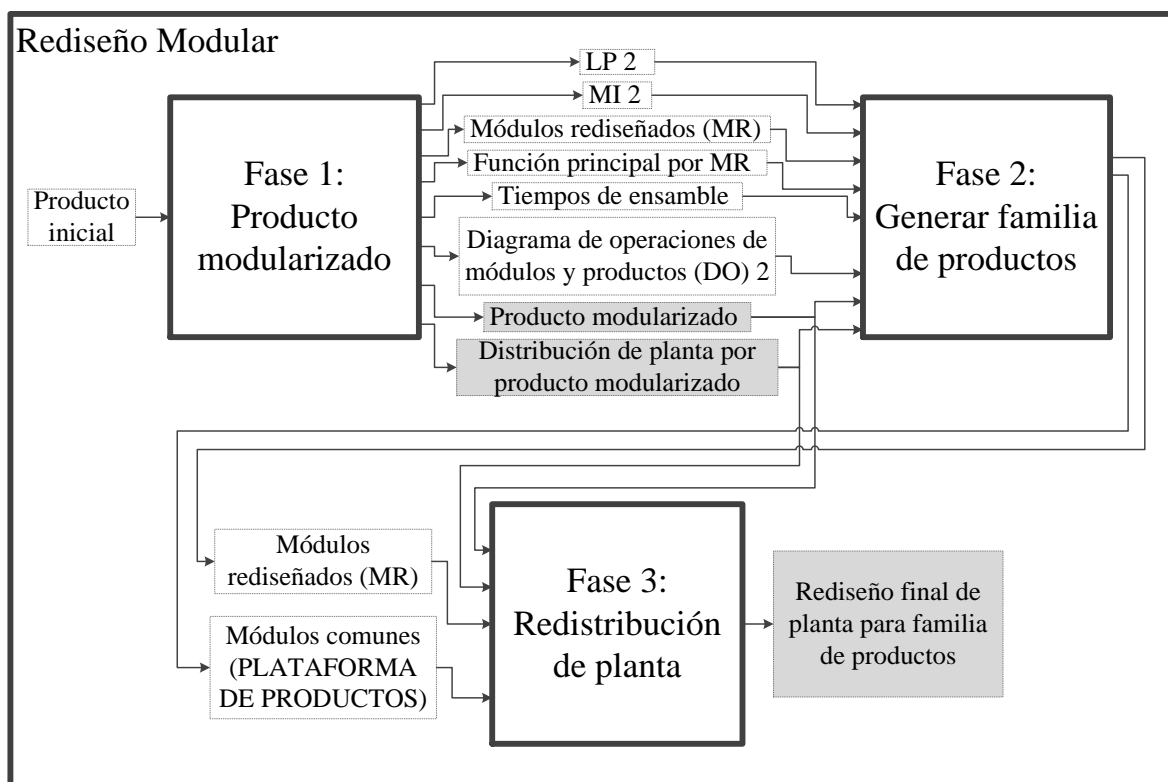


Figura 15. Esquema general de relación entre fases para el rediseño modular. Elaboración propia

3.1 Primera fase de productos modularizados: de los productos iniciales a los productos modularizados y a la distribución de planta para su producción.

3.1.1 Etapa de análisis del producto inicial.

En esta etapa el objetivo es conocer el producto y obtener los primeros indicadores de diseño para el ensamble. Dichos indicadores permitirán entender en qué estado está el diseño y la pertinencia de la implementación de la metodología trabajada. Esta etapa consiste principalmente, en desensamblar e identificar las piezas y los módulos iniciales, generando la lista de piezas (LP) en los respectivos módulos. Asimismo, esta fase incluye la clasificación de las piezas, la realización del análisis funcional (AF), el desarrollo de la matriz de interacción (MI) y el cálculo de la eficiencia de diseño (ED). Para finalizar esta fase, se debe ensamblar el producto de nuevo para realizar el diagrama de operaciones (DO), hallar los tiempos de ensamble y encontrar la eficiencia de ensamble (EE). A continuación se muestra la etapa con sus entradas y salidas y las operaciones de la etapa. Todas las salidas de esta etapa están numeradas con el número 1 para facilitar el conteo de los cambios realizados (Figura 16).

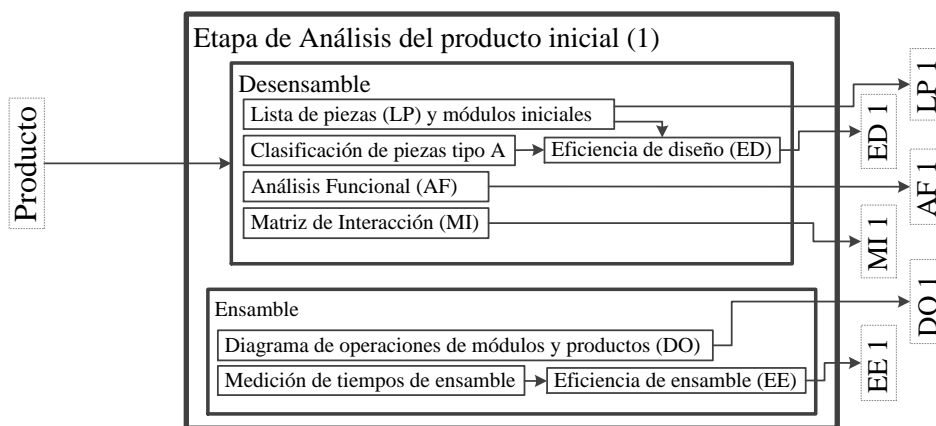


Figura 16. Etapa de análisis del producto inicial (Fase 1). Elaboración propia

3.1.1.1 Desensamble de los productos iniciales.

Para el correcto entendimiento de esta investigación y facilitar la explicación de su procedimiento, se asignó un nombre y un número a cada pieza del producto y se agruparon las piezas en los módulos iniciales (Figura 17 y Figura 18). Es preciso aclarar que no se explicitó la cantidad de unidades de cada pieza, debido a que no aporta nada nuevo al propósito de esta investigación. Por lo tanto, cada vez que se presentaron piezas iguales, como los empaques, se tomaron como una sola pieza. Las piezas que unen los módulos y que pueden hacer parte de la interfaz, como en este caso los tornillos, se incluyeron en uno de los módulos que unen. Sin embargo, es de anotar que podrían no incluirse en ninguno de los dos módulos haciendo que estos tengan menos interacciones y que se pueda disponer de la interfaz para otros análisis.

m1	1	Hélice	m2	13	tonillos largos	m4	24	Cable de alimentación
	2	Empaque café		14	Antideslizante gris			
	3	tapa inferior		15	base inferior			
	4	cilindro de cobre		16	sujeta cable			
	5	Arandela		17	tornillos sujeta cable			
	6	Acople macho		18	base			
	7	Tuerca		19	arandelas motor			
	8	Sujetador tapa inferior		20	empaque apoya motor			
	9	Empaque gris	m3	21	Acople hembra	m8	39	Perilla de velocidades
	10	jarra		22	tuerca de acople			
	11	tapa jarra		23	Tapa acople			
	12	Tapa de tapa						
m5	25	Cable 25 cm	m6	33	Sub ensamble tarjeta de velocidades	m7	34	tornillo
	26	Cable 7 cm					35	conectores de cobre
	27	ventilador					36	resorte
	28	tornillo ventilador					37	activador
	29	Empaque laterales motor					38	base seguro
	30	Empaque eje motor						
	31	Arandela de presión eje motor						
	32	Sub ensamble motor						

Figura 17. Desensamble de la licuadora.

En cada recuadro se muestra en la primera columna el número del módulo, en la segunda columna el número de la pieza y en la tercera columna el nombre de la pieza.

m1	1	Empujador de alimentos	m2	15	Tapa tornillo eje
	2	Tapa Jarra		16	Tornillo Eje
	3	Guia superior de eje metálico		17	Base eje
	4	Rallador Circular		18	Pin de engrane
	5	Cuchilla Rebanadora		19	Engrane macho metálico
	6	Remaches		20	Pin candado eje
	7	Guia media de eje plástico		21	Arandela naranja eje
	8	Cuchilla pica todo		22	Cilindro superior
	9	Soporta cuchilla		23	Cilindro inferior
	10	Jarra		24	Arandela gris
	11	Activador de seguro jarra		25	Arandela de cobre
	12	Resorte jarra		26	Arandela blanca
	13	Tapa seguro		27	Arandela larga
	14	Tornillo jarra		28	Empaque eje
		29	Eje metálico		
		30	Eje Plástico		

m3	31	Base de engranaje	m4	38	Base negra	m5	41	Base gris
	32	Eje engrane plástico		39	Cordón de empaque		42	Antideslizantes
	33	Guia eje motor		40	Guia engranes		43	Tornillos para base gris
	34	Arandela roja					44	Ventosas
	35	Engrane plástico			45		Tornillos para ventosas	
	36	Arandela naranja						
	37	Pin candado engrane						

m6	46	Cable de alimentación	m7	49	Suiche de seguridad
	47	Pisa cable de alimentación		50	Tornillo suiche
	48	Tornillo pisa cable de alimentación		51	Base seguro
			52	Activador de seguro	
			53	Resorte seguro	
			54	Tornillo seguro	
			55	Cable Blanco	

m8	56	Subensamble Motor	m9	62	Perilla control velocidad
	57	Engrane eje motor			
	58	Ventilador	m10	63	Tarjeta de velocidades
	59	Tornillos sujeta motor		64	Tornillos tarjeta de velo
	60	Tapón empate cables		65	Cable rojo
	61	Abrazadera cable			

Figura 18. Desensamble del procesador de alimentos.

En cada recuadro se muestra en la primera columna el número del módulo, en la segunda columna el número de la pieza y en la tercera columna el nombre de la pieza.

3.1.1.2 Clasificación de piezas tipo A y eficiencia de diseño

Luego del desensamble de ambos productos, se procedió a obtener la clasificación de piezas tipo A para posteriormente calcular el índice de diseño. Este índice se calculó siguiendo los pasos descritos en el capítulo 2 (página 14). En las gráficas a continuación, se presenta la clasificación de las piezas tipo A (Figura 19 y Figura 20). Las piezas que no aparecen en esta clasificación son las piezas tipo B y son las que tienen mayor posibilidad

de ser modificadas. Luego de hacer el listado de piezas de ambos productos, se aplicó la ecuación (2) y se obtuvo para la licuadora una eficiencia de diseño del 60,78% y para el procesador de alimentos un 31,68%.

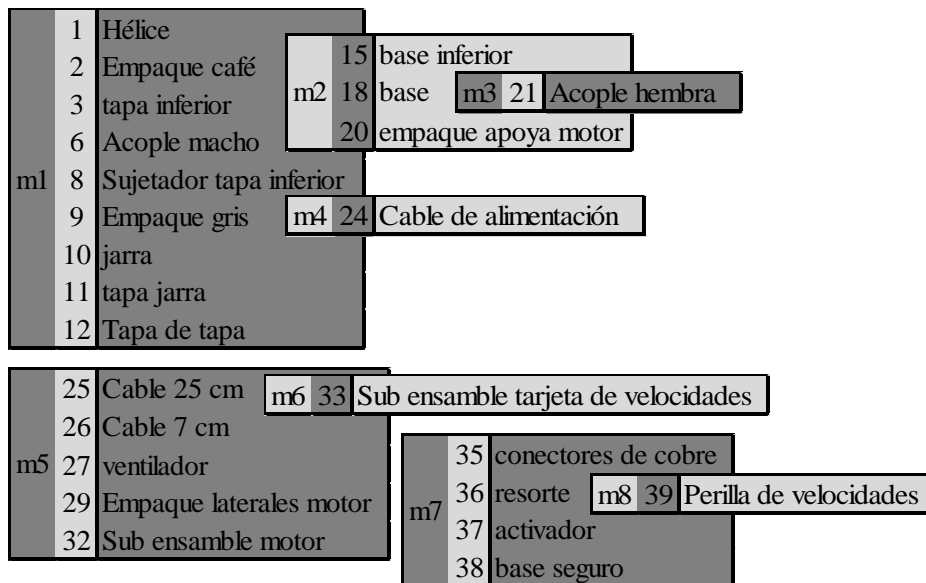


Figura 19. Lista de piezas tipo A de la licuadora.

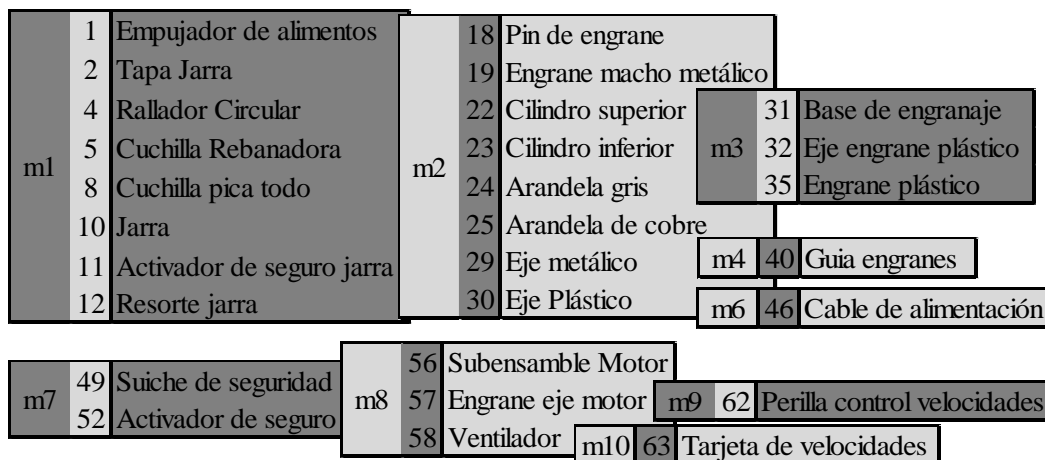


Figura 20. Lista de piezas tipo A del procesador de alimentos

3.1.1.3 Análisis Funcional y diagrama funcional de los productos iniciales

Para hacer el análisis funcional se trabajó siguiendo exactamente las propuestas de Otto y Wood en su libro *Product design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development* (Otto & Wood, 2001, págs. 162-177). Primero se identificaron cadenas funcionales. Es decir, se identificaron los procesos de transformación de cada uno de los flujos, a través de las piezas del producto. Luego se ensamblaron todas las cadenas para así formar el análisis funcional completo. Como flujos de entrada para la licuadora se obtuvo principalmente energía eléctrica, fuerza humana y aire que entra a la licuadora, y como flujos de salida se obtuvo, calor disminuido, aire caliente, ruido y energía rotacional para mover las cuchillas de la licuadora (Figura 21). Por su parte, para el procesador de

alimentos se obtuvo como flujos de entrada energía eléctrica, fuerza de acción y aire que entran al procesador, y como flujos de salida, ruido y energía cinética rotacional para mover las cuchillas del procesador (Figura 22).

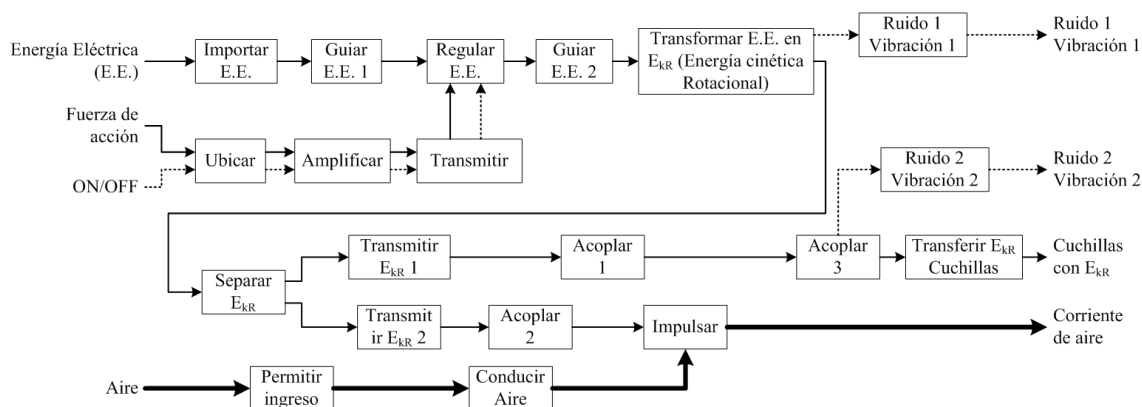


Figura 21. Diagrama funcional de la licuadora.

Se esquematiza los diferentes flujos que conforman el correcto funcionamiento de la licuadora. Elaboración propia

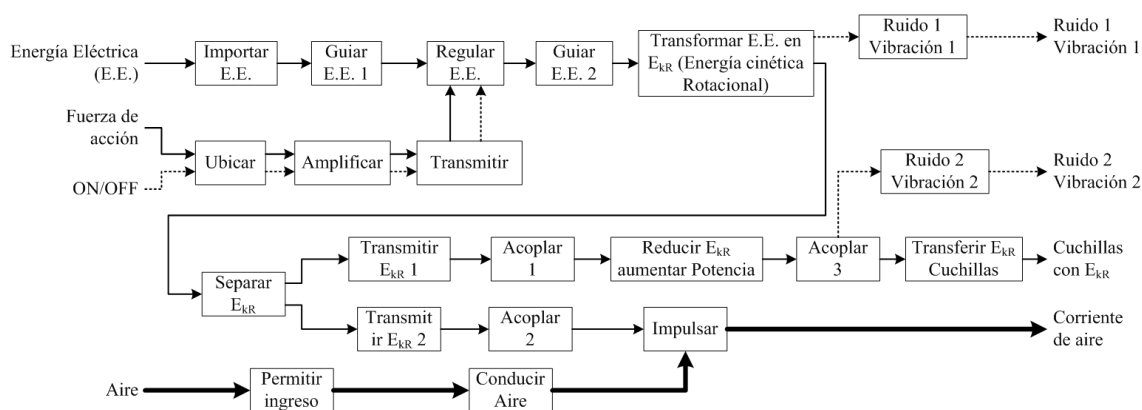


Figura 22. Diagrama funcional del procesador de alimentos.

Se esquematiza los diferentes flujos que conforman el correcto funcionamiento del procesador de alimentos. Elaboración propia

3.1.1.4 Matriz de interacción

Para crear la matriz de interacción se ubicó en la primera columna y en la primera fila los números asignados a las piezas en orden de desensamblable. Luego se definió cómo cada una de las piezas interactúa con las demás. El contacto entre la pieza i y la pieza j se denota con un *uno* en la casilla que las intersecta. El mapa de *unos* que se crea en la matriz depende del orden en el que se hayan ubicado las piezas en las columnas (o en las filas), debido a esto cuando se desensamblaron los productos se agruparon las piezas en subensambles obteniendo los módulos iniciales.

La matriz de interacción para la licuadora evidenció ocho módulos diferentes, los cuales tienen piezas con un gran número de interacciones dentro de cada módulo, a excepción de m4, m6 y m8 que aparecen con una sola pieza. Estos módulos, se tomaron de esta manera porque se supuso que estas piezas son ensambladas en otro lugar y entran como suministros

a la cadena de producción. Se vio a su vez, como hay interacciones de piezas por fuera de sus módulos, las cuales corresponden evidentemente, a las interacciones entre los diferentes módulos. Para entender la matriz de interacción, tenemos que los números a la izquierda y en la parte superior de la matriz representan la numeración de las piezas, los unos simbolizan las interacciones entre las piezas, los recuadros grises demarcan los módulos iniciales y los ovalos muestran las interacciones que son candidatas a ser modificadas (Figura 23 y Figura 25).

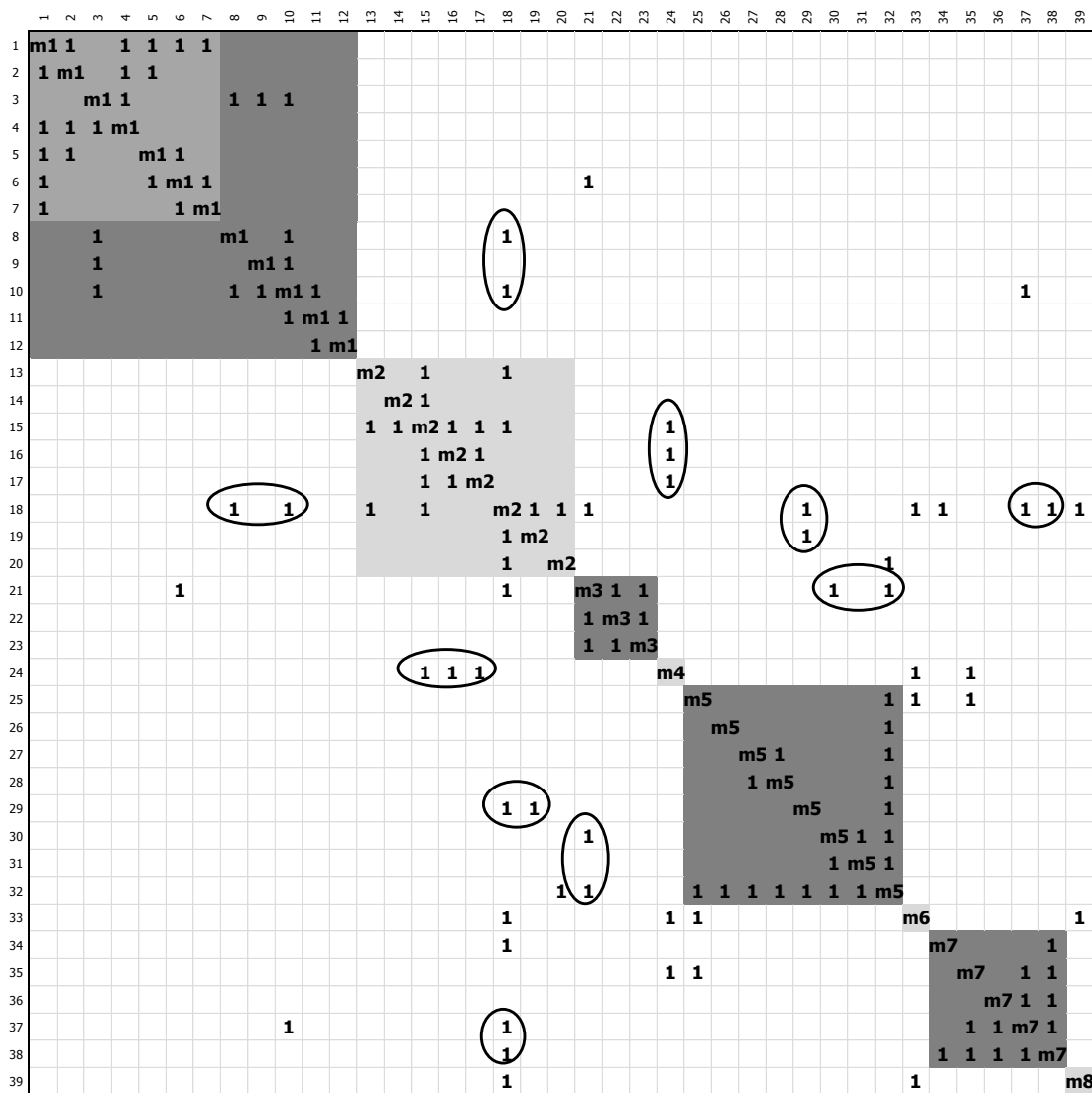


Figura 23. Matriz de interacción para la licuadora.

Los ovalos representan las interacciones entre módulos que son candidatos a modificar.

Como parte del análisis es importante tener en cuenta las funciones de las piezas y de las interacciones, para que al momento de tomar decisiones sean acertadas si se van a modificar las piezas. En el caso de la licuadora, el módulo 1 en la Figura 23 tiene un subconjunto fijo del eje y las cuchillas de corte (piezas de 1 a 7) como un módulo de entrada de un proveedor independiente. El órgano de la interacción entre las partes 1 y 4

tiene las funciones de: Guiar la rotación de la pieza 1, y proporcionar una larga vida por lubricación. La pieza 4 es un cojinete de retención de aceite, un sinterizado de bronce. Las interacciones entre las piezas 1 y 2, las piezas 2 y 3 (2 unos en la matriz de interacción), las piezas 2 y 5, y las piezas 5 y 6 tienen la función de retener axialmente la pieza 1. Las piezas de la 1 a la 7 forman un grupo que es un módulo u órgano que tiene como función general retener la hélice de corte, pieza 1 axialmente fija, pero en libre rotación con una lubricación de por vida y transmitir la rotación y la energía para las cuchillas¹⁸ La interacción de las piezas 6 y 32 tiene la función de transmitir la rotación del motor a las cuchillas de corte (Todas las funciones que se utilizan para esta descripción fueron tomadas de las Tabla 1)

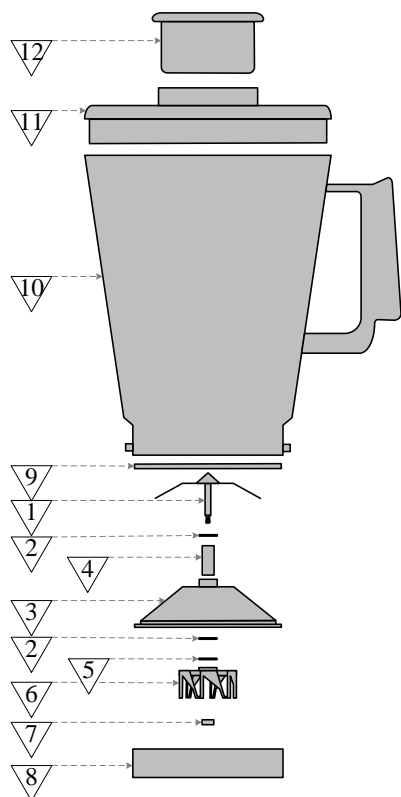


Figura 24. Vista en explosión de la jarra de la licuadora.

En el caso del procesador de alimentos se realizó un estudio similar en donde la matriz de interacción evidenció diez módulos diferentes, los cuales tienen piezas con un gran número de interacciones dentro de cada módulo a excepción de m9. Dicho módulo que se compone de una sola pieza, se tomó de esta manera porque no pertenece a ningún otro modulo y porque además para desensamblar el procesador de alimentos se sugiere retirarlo en primer lugar. A su vez, el desarrollo de la matriz de interacción del procesador de alimentos permitió la identificación de interacciones de piezas por fuera de sus módulos, las cuales, como ya hemos visto, corresponden a las interacciones entre los diferentes módulos (Figura 25). Debido a que esta matriz es de un tamaño superior que la matriz de la licuadora, en vez de *unos*, las interacciones entre piezas fueron representadas con cuadros negros para

¹⁸ Este párrafo es una contribución del Profesor Emérito Ernst Eder del Royal Military College of Canada, durante el trabajo conjunto, traducido por Sebastián Lugo

apreciar mejor el patrón de las interacciones entre ellas. En esta matriz, los números a la izquierda y en la parte superior de la matriz representan la numeración de las piezas, los cuadros negros, como ya se explicó, simbolizan las interacciones entre las piezas, los recuadros grises demarcan los módulos iniciales y los ovalos muestran las interacciones que son candidatas a ser modificadas.

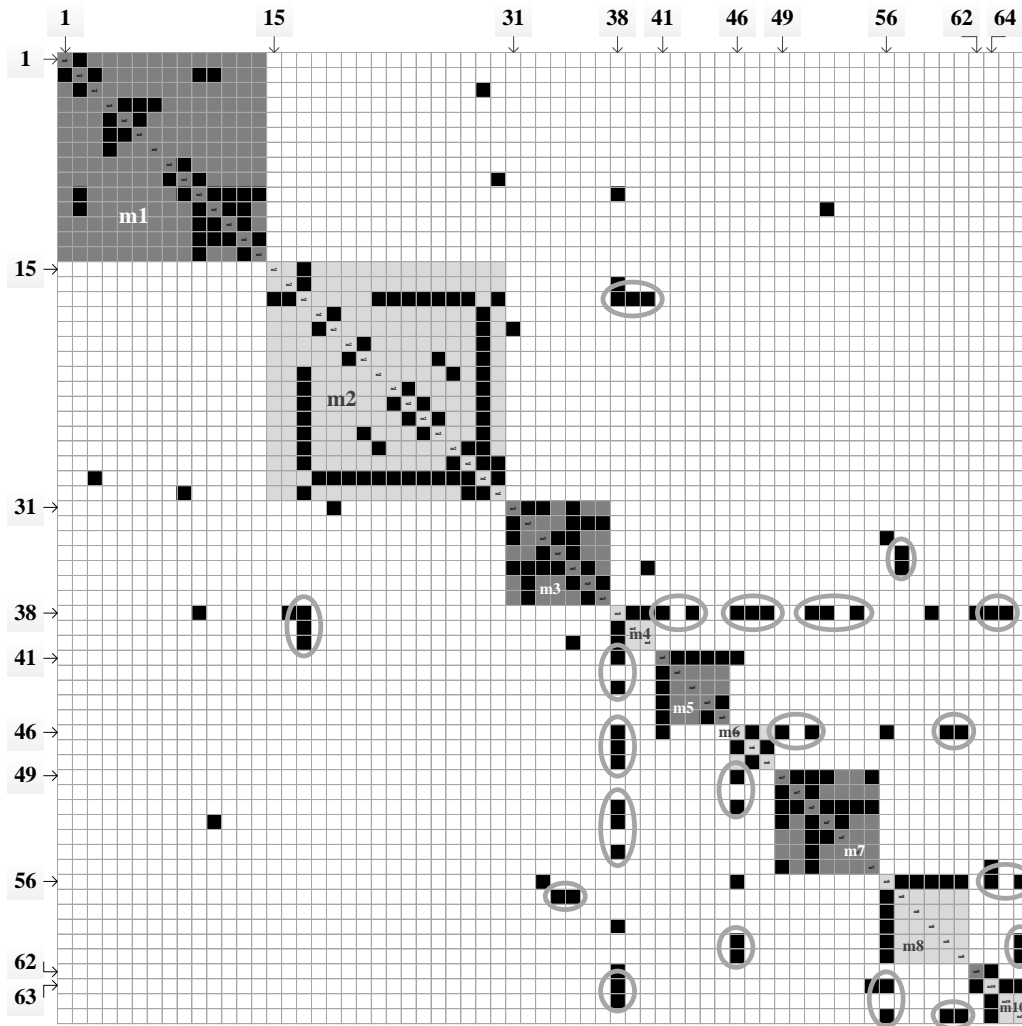


Figura 25. Matriz de interacción para el procesador de alimentos

En este diagrama los cuadros negros representan los *unos* que se utilizan para mostrar las interacciones

3.1.1.5 Diagrama de operaciones

Para entender mejor el diagrama de operaciones para ambos productos se presenta un esquema en donde se ve el módulo Jarra (m1) en explosión junto con la numeración de las operaciones necesarias para ensamblar este módulo (Figura 26 izquierda y Figura 28 izquierda). Los óvalos presentes en cada diagrama de operaciones representan los módulos analizados anteriormente.

En el caso de la licuadora, las piezas 35, 36, 37 y 38 fueron previamente ensambladas por medio de las operaciones 19, 20 y 21. Estas pueden ejecutarse de manera simultánea que

las operaciones 16, 17 y 18 (Figura 27). Mientras que para el procesador de alimentos, las piezas 63, 65 y 55 fueron previamente ensambladas por medio de las operaciones 20 y 21, las cuales pueden ejecutarse de manera simultánea con las operaciones 28 y 29, que ensamblan las piezas 38, 40 y 39 (Figura 29).

Se evidenció en el diagrama de operaciones de ambos productos antes de modularizar que los módulos se intersectaban en su proceso de ensamble y que se presentan operaciones que impiden el ensamble de los módulos por separado (Figura 27 y Figura 29). Por esta razón es tan importante hacer estos esquemas ya que ayudan a organizar los procesos de ensamble y la idea es tener módulos que tengan en cuenta las interacciones y también los diagramas de operaciones.

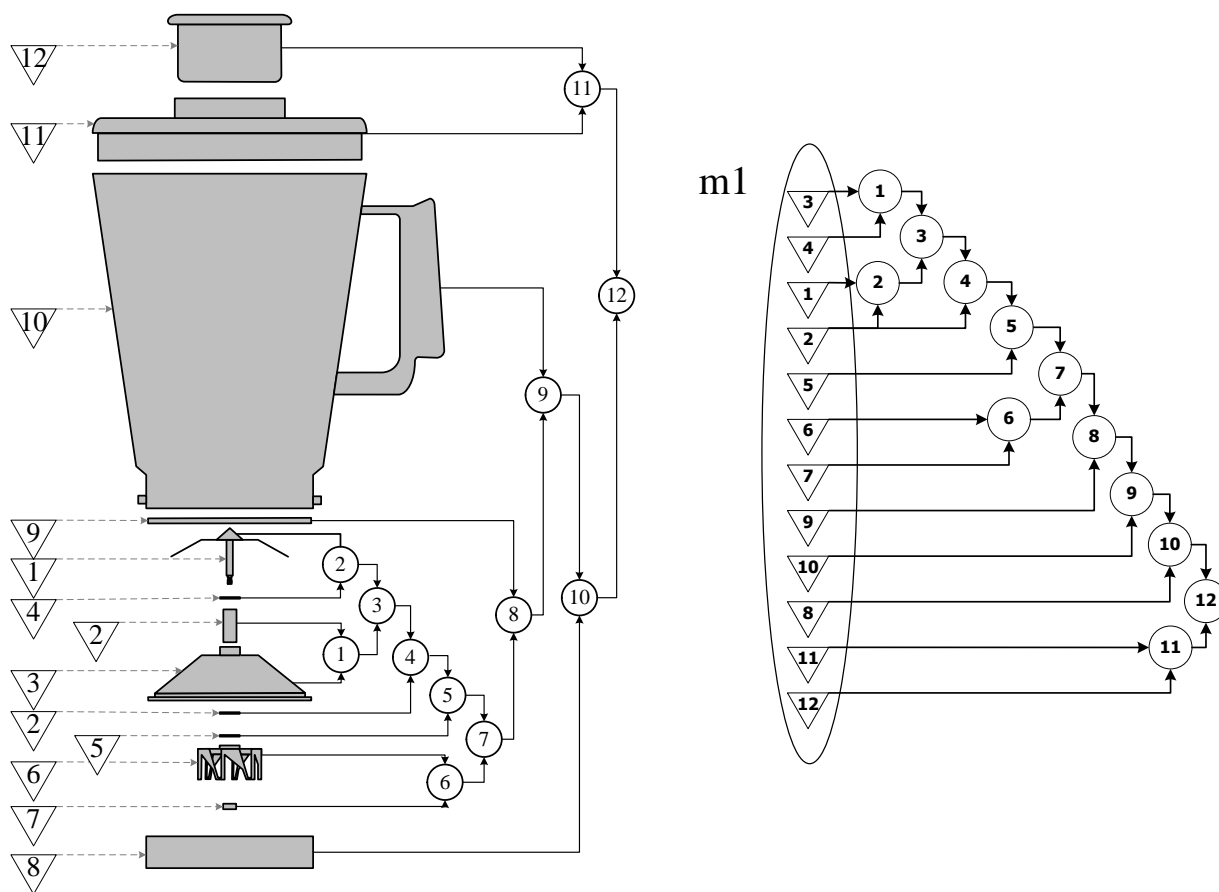


Figura 26. Diagrama de operaciones para la jarra de la licuadora.

Lado izquierdo, esquema del módulo Jarra (m1) en explosión junto con las operaciones. Lado derecho, diagrama de operaciones del módulo Jarra (m1).

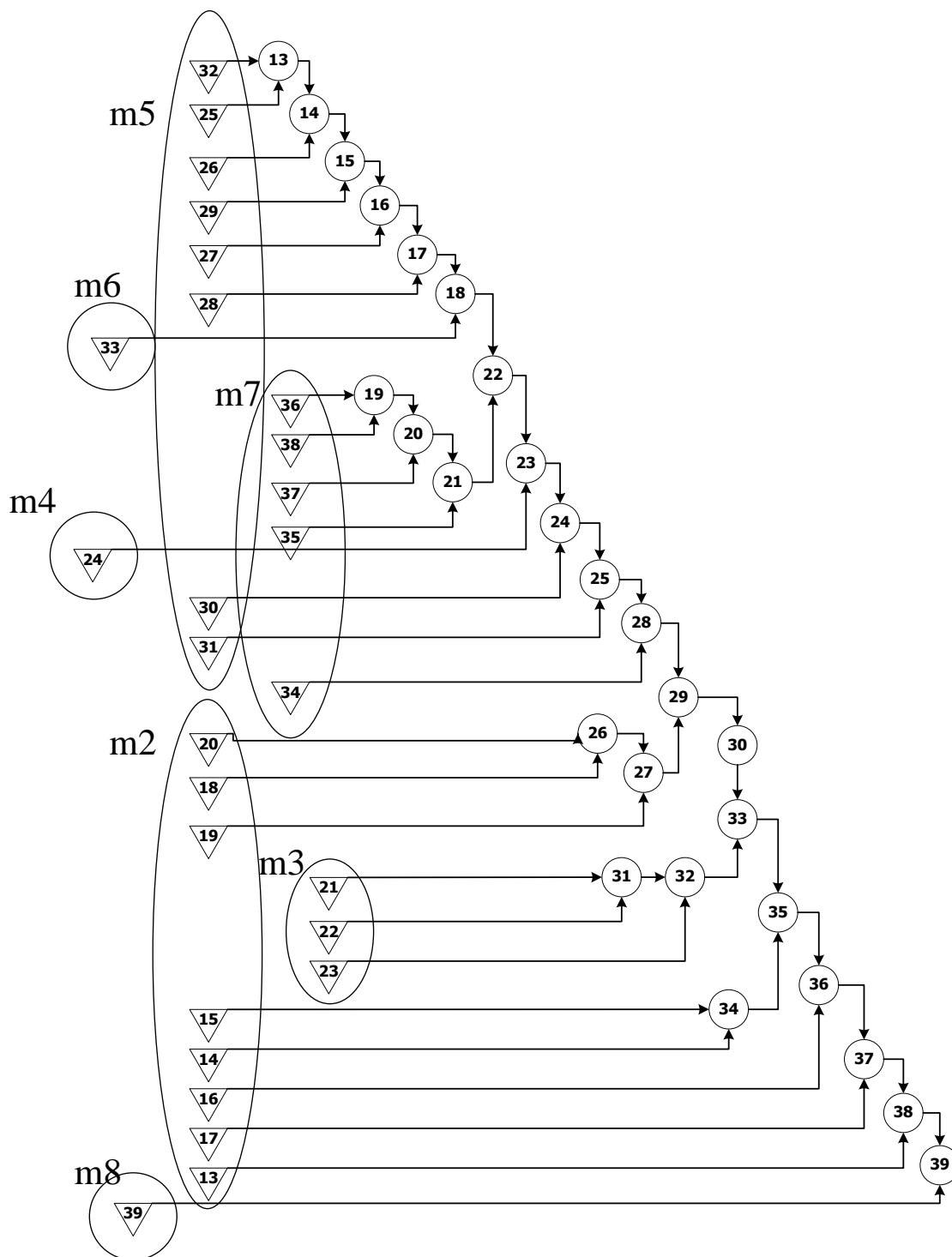


Figura 27. Diagrama de operaciones de la base de la licuadora antes de modularizar

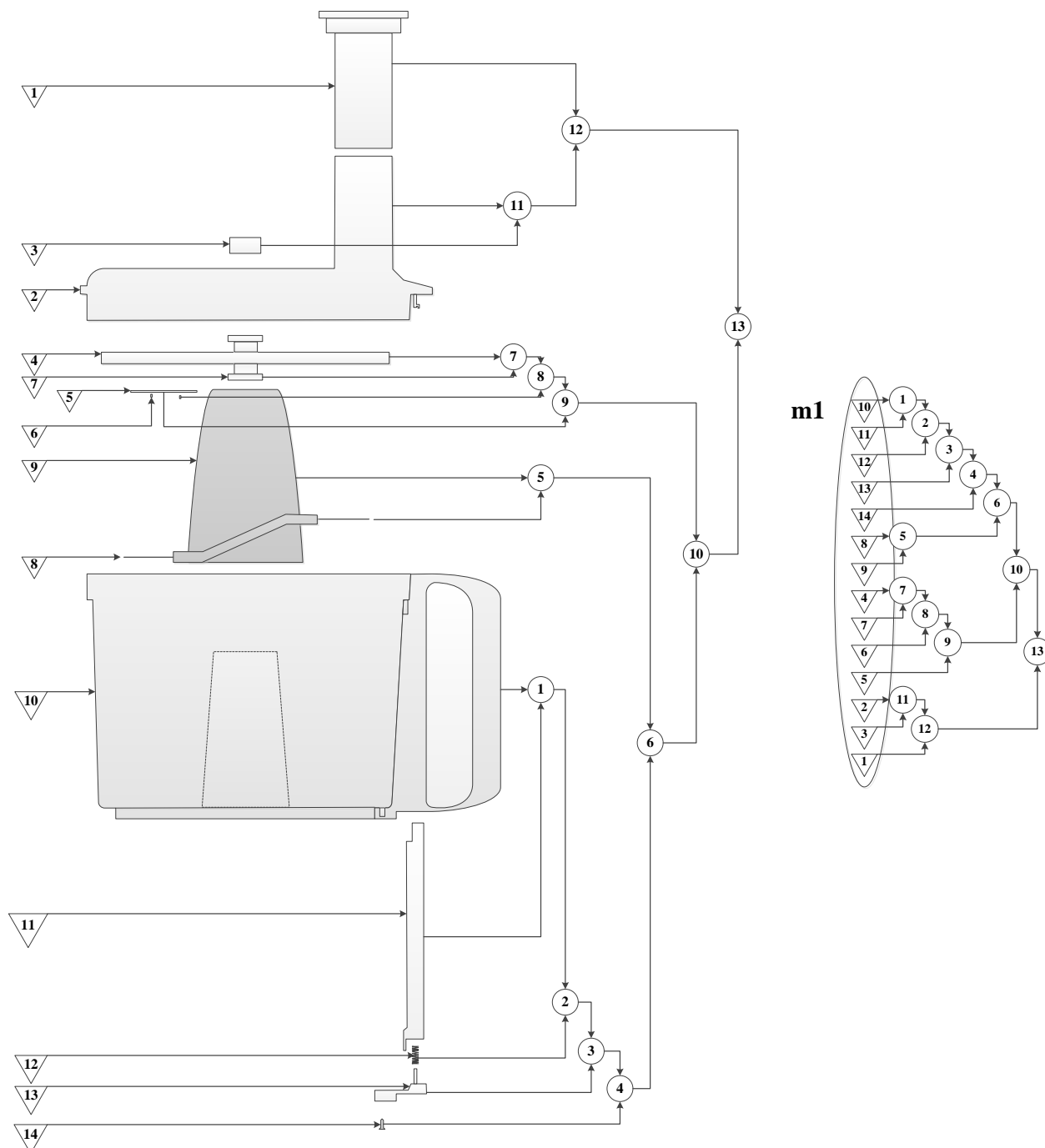


Figura 28. Diagrama de operaciones para la jarra del procesador de alimentos.

Lado izquierdo, esquema del módulo Jarra (m1) en explosión junto con las operaciones. Lado derecho, diagrama de operaciones del módulo Jarra (m1).

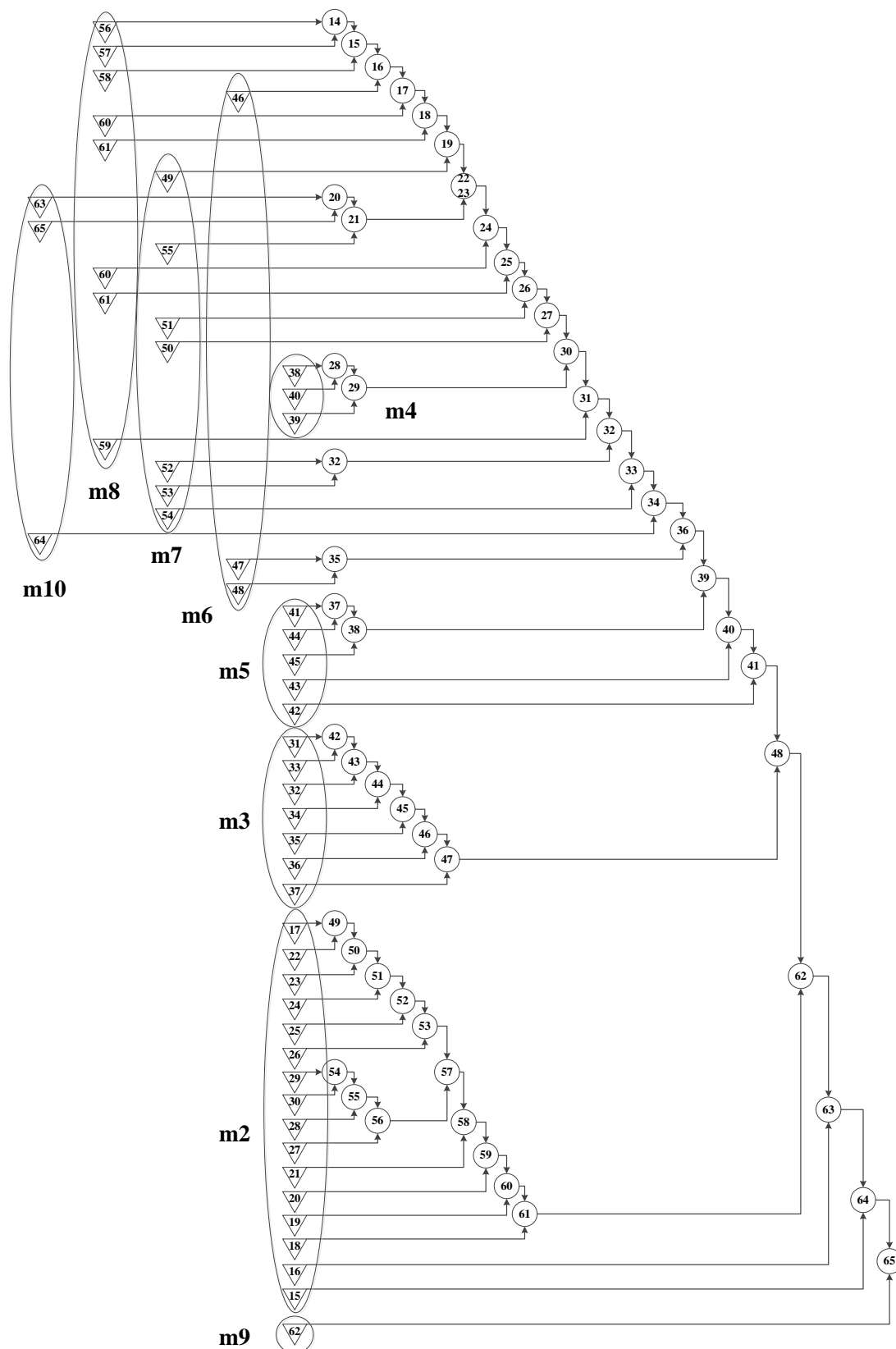


Figura 29. Diagrama de operaciones de la base del procesador de alimentos antes de modularizar

3.1.1.6 Medición de los tiempos de ensamble y cálculo de la eficiencia de ensamble

Para calcular los tiempos de ensamble de los productos se recomienda ensamblarlos y desensamblarlos varias veces para adquirir cierto grado de experticia en el ensamble y acercarse a los tiempos reales de ensamble en planta. En esta investigación, los productos se ensamblaron y desensamblaron aproximadamente 20 veces y se promediaron los últimos 6 tiempos obtenidos. El tiempo total de ensamble para la licuadora fue de 528,95s y se obtuvo una eficiencia de ensamble del 29,3%, dicha eficiencia fue calculada teniendo en cuenta la teoría presentada en el capítulo 2 y la ecuación(3). Para el procesador de alimentos, se obtuvo un tiempo total de ensamble de 1115,73s y una eficiencia de ensamble del 8,6%.

Al terminar esta etapa tenemos entonces un conjunto de resultados como la eficiencia de diseño, la matriz de interacción etc. Que ya dan luces de las piezas que son las candidatas a ser rediseñadas. El índice de diseño y el índice de ensamble evidencian cuantitativamente la pertinencia de mejorar estos productos por medio de nuestra metodología de rediseño, para así aumentar dichos índices y aportar a la eficacia y eficiencia de su proceso de producción.

3.1.2 Etapa creativa: Proceso de modularización con DFA.

Esta etapa es la parte central de esta fase, ya que es donde se modulariza el producto y se rediseñan los módulos. Para implementarla, se ingresaron todas las salidas, en términos de medidas, de la etapa anterior EE1, MI1, DO1, AF1, ED1 y LP1, y se modificaron para convertirlas en las salidas de esta segunda etapa. Además, tenemos una salida importante, que a su vez es salida de la fase, que son los módulos rediseñados. Esta etapa cuenta con operaciones de identificación y de aplicación del DFA, para lograr rediseñar cada uno de los módulos, además se implementan las modificaciones al desensamble y al ensamble, pasos de la etapa anterior (Figura 30). Todas las salidas de esta etapa, que son modificaciones a las entradas, están etiquetadas con el número 2.

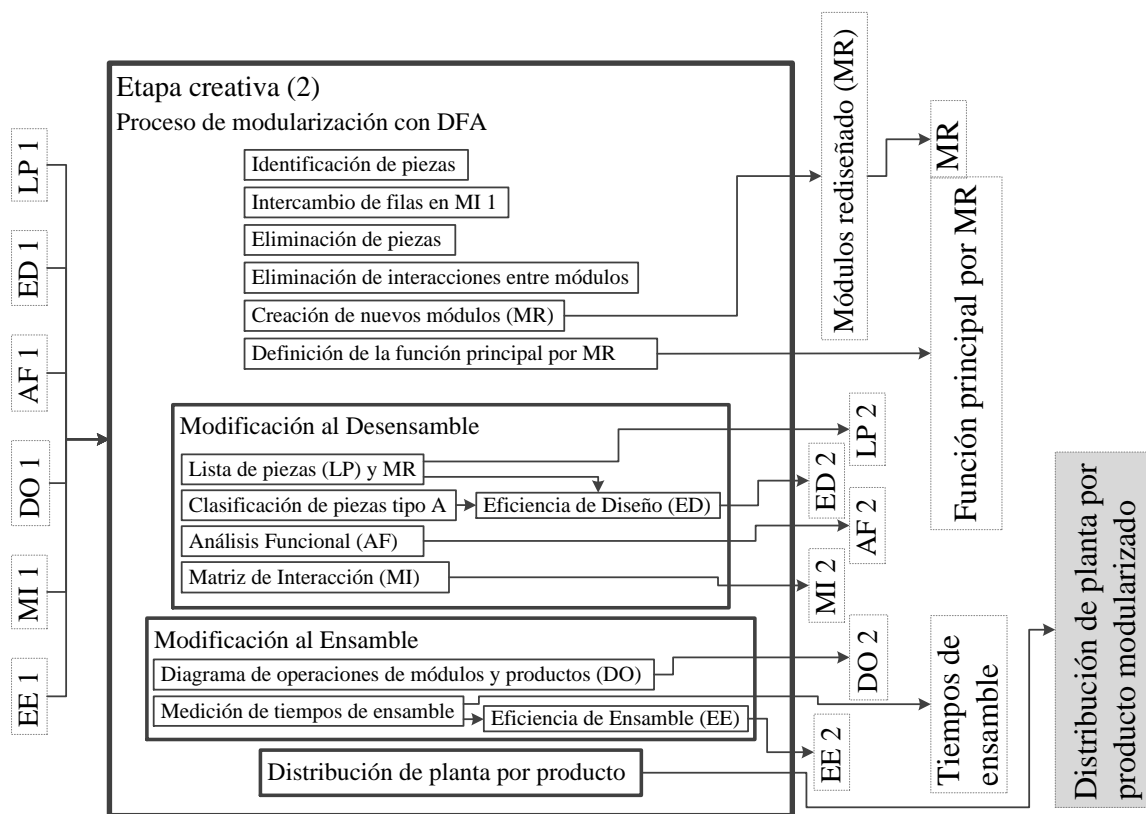


Figura 30. Etapa creativa (Fase 1). Elaboración propia

3.1.2.1 DFA en función de la matriz de interacción

La evaluación del producto con DFA en función de la matriz de interacción, se enfocó en eliminar y realinear los *unos* que se encontraban por fuera de los módulos (cuadros negros en las matrices del procesador de alimentos). Primero, se disminuyeron las interacciones que una sola pieza tiene con los diferentes módulos sin contar el módulo al que pertenece, y luego se procedió a disminuir las interacciones entre módulos a una sola. Como la eliminación de un *uno* o un cuadro negro dentro de la matriz tiene fuertes implicaciones en el producto, es importante que cada propuesta de mejora sea validada con DFA, pues como se ha señalado en el capítulo 2, esta teoría precisa evaluar los alcances de cada posible cambio en el producto final manteniendo intactos la funcionalidad y el desempeño de este. Uno de los objetivos de este proceso es volver la matriz de interacciones lo más modular posible, y para su realización se siguieron cuatro pasos: identificación de las piezas que tienen interacciones por fuera de su módulo, intercambio de filas, eliminación de piezas y eliminación de interacciones.

Para la identificación de piezas, se evaluaron las piezas que tenían más de una interacción con el mismo módulo sin contar el módulo al que pertenecen. Para la licuadora, se identificaron los *unos* que cumplen con la anterior premisa en la matriz de interacción (Figura 23). Esta matriz evidencia qué piezas deberían rediseñarse para intentar que cada una tenga como máximo una interacción con los otros módulos. En la licuadora dichas piezas son: la Base (18), Acople hembra (21), Cable de alimentación (24) y Empaques laterales del motor (29) (Tabla 11). Para el procesador de alimentos, se identificaron los

cuadros negros que cumplen con la anterior premisa en la matriz de interacción (Figura 25). Esta matriz evidencia qué piezas deberían rediseñarse para intentar que cada una tenga como máximo una interacción con los otros módulos. En el procesador de alimentos dichas piezas son: el Engranaje eje Motor (57), la Base eje (17), Base negra (38) Cable de alimentación (46), Cable rojo (65) y Sub ensamble motor (56) (Tabla 12).

Tabla 11. Piezas de la licuadora que interactúan más de una vez por fuera de su módulo

Nombre de la pieza	Interactúa por fuera de su módulo con:
Base (18)	Sujetador tapa inferior (8)
	Tapa Jarra (11)
	Activador (37) Base seguro (38)
Acople hembra (21)	Empaque eje motor (30) Subensamble motor (32)
Cable de alimentación (24)	Base inferior (15) Sujeta cable (16) Tornillo sujeta cable (17)
Empaques laterales del motor (29)	Base (18) Arandelas Motor (19)

Tabla 12. Piezas del procesador de alimentos que interactúan más de una vez por fuera de su módulo

Nombre de la pieza	Interactúa por fuera de su módulo con:
Engranaje eje Motor (57)	Arandela roja (34) Engrane plástico (35)
Base eje (17)	Base negra (38) Cordón de empaque (39) Guía de engranajes (40)
Base negra (38)	Base gris (41) Tornillos para base gris (43)
	Cable de alimentación (46) Pisa cable de alimentación (47) Tornillo pisa cable de alimentación (48)
	Base seguro (51) Activador de seguro (52) Tornillo seguro (54)
	Tarjeta de velocidades (63) Tornillos tarjeta de velocidades (64)
	Suiche de seguridad (49) Base seguro (51)
Cable de alimentación (46)	Tapón empate cables (60) Abrazadera cable (61)
Cable rojo (65)	Tapón empate cables (60) Abrazadera cable (61)
Sub ensamble motor (56)	Tarjeta de velocidades (63) Cable rojo (65)

La realización del intercambio de filas en la matriz de interacción se comenzó con la determinación de cuáles de estas piezas interactuaban más por fuera de su módulo que dentro de su propio módulo, para así realizar los cambios apropiados entre las filas de la matriz (y las columnas para mantener la simetría) y reorganizarla de manera que se disminuyeran las interacciones entre módulos (Figura 34 y Figura 35). Para entender los intercambios de la filas (y de las columnas) se utilizó la notación $R_i \xrightarrow{\quad} R_j$, para especificar que la fila i será cambiada por la fila j (y las columnas tuvieron el mismo tratamiento para mantener la simetría).

Para la licuadora, el empaque lateral del motor (29) cumple con lo mencionado; perteneciendo a m5 tiene dos interacciones con m2 y solo interactúa una sola vez dentro de su propio módulo. La primera operación que se realizó fue quitar el empaque lateral del motor (29) de m5 y ponerlo en el módulo m2. Debido a que poner los empaques primero a la base no permitiría su ensamble, se tuvo que realizar un cambio en la forma de ensamblar el subensamble motor (32) a la base (18), y un cambio en la forma física de los empaques laterales del motor (29) (Figura 31). Este cambio en la matriz de interacción se hace mediante 8 intercambios sucesivos como sigue: $R_{29} \xrightarrow{\quad} R_{28}$, $R_{28} \xrightarrow{\quad} R_{27}$, $R_{27} \xrightarrow{\quad} R_{26}$, $R_{26} \xrightarrow{\quad} R_{25}$, $R_{25} \xrightarrow{\quad} R_{24}$, $R_{24} \xrightarrow{\quad} R_{23}$, $R_{23} \xrightarrow{\quad} R_{22}$, $R_{22} \xrightarrow{\quad} R_{21}$ (Figura 34).

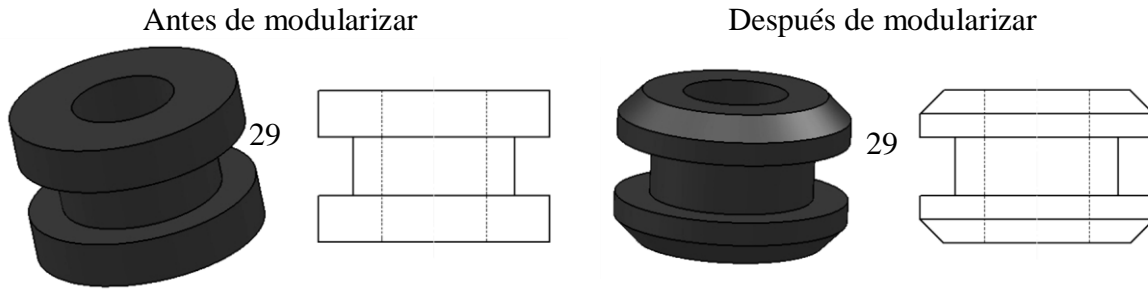


Figura 31. Cambio realizado en los empaques laterales del motor (29)

Para el procesador de alimentos, se hicieron intercambios sucesivos para que la Perilla control de velocidades (62) estuviera en la última fila y en la última columna, debido a que es la última pieza que se ensambla. Como se puede ver en el diagrama de operaciones, la representación matemática de estos intercambios es como sigue: $R_{62} \xrightarrow{\quad} R_{63}$; $R_{63} \xrightarrow{\quad} R_{64}$; $R_{64} \xrightarrow{\quad} R_{65}$ (Figura 35).

Es importante recordar que los módulos se escogieron por la facilidad de desensamblar, por tanto, la pertenecía al módulo implica un orden específico en el desensamblar. Un cambio en el orden puede implicar desensamblar, y por tanto ensamblar, de manera diferente.

Estudiando las piezas de la licuadora y del procesador de alimentos y evaluándolas según sus funciones y su ensamble, se encontró que tiene dos piezas totalmente iguales y que podemos prescindir de ellas sin afectar la funcionalidad de los productos, por lo tanto se procedió a la eliminación de piezas que se indican a continuación, tercer paso de esta etapa. El sujeta-cable (16, licuadora) (47, procesador) y el tornillo sujeta-cable (17, licuadora) (48,

procesador) tienen como única función sujetar el cable de alimentación (24, licuadora) (46, procesador) a la base y transferir cualquier fuerza tirante en el cable de alimentación (24, licuadora) (46, procesador) a la base. Para eliminar estas dos piezas es necesario modificar la base inferior (15, licuadora) (38, procesador) y hacerle un nudo al cable de alimentación (24, licuadora) (46, procesador), logrando que este se mantenga en su posición (Figura 32) y el nudo transfiera cualquier tipo de fuerza tirante a la base. La eliminación de estas dos piezas produce una reorganización en la matriz de interacciones (Figura 34 y Figura 35), mostrando una menor cantidad de *unos* en la matriz de la licuadora y una menor cantidad de cuadros negros en la matriz del procesador de alimentos por fuera de los módulos, lo que implica un acercamiento a un producto más modular.

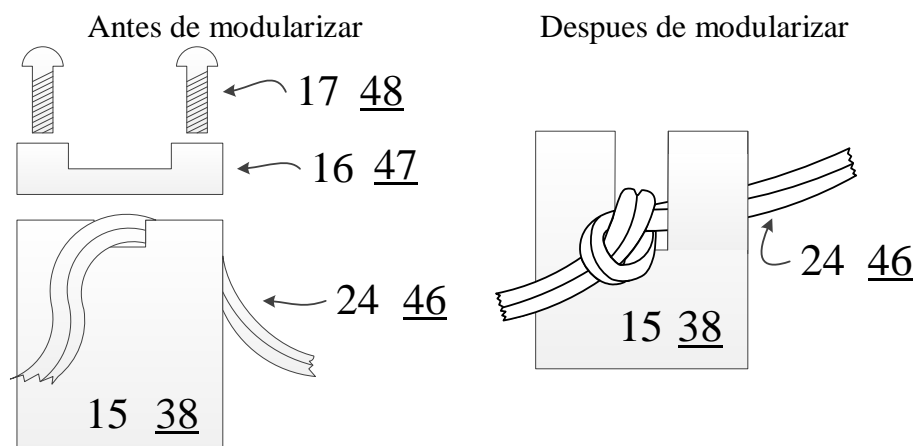


Figura 32. Eliminación de piezas para la licuadora y el procesador de alimentos.

La numeración subrayada pertenece al procesador de alimentos, la que no está subrayada pertenece a la licuadora. Cable de alimentación (24, licuadora) (46, procesador) y pequeña parte de la base inferior (15, licuadora) (38, procesador). Lado izquierdo: piezas candidatas a ser eliminadas, Sujeta cable (16, licuadora) (47, procesador) y tornillo sujeta-cable (17, licuadora) (48, procesador), Lado derecho: Propuesta de Rediseño en la pequeña parte de la base inferior (15, licuadora) (38, procesador).

Para el procesador de alimentos se eliminaron también dos de tres tornillos del seguro (54). Aunque esto no elimina el número de interacciones, hace que el ensamble sea más fácil, ya que se disminuyen dos tornillos que se tienen que atornillar. Por la forma en la que fue construido el seguro, no es necesario modificarlo, funciona perfectamente con un tornillo en vez de tres. Se eliminaron además, los dos tornillos de la tarjeta de velocidades (64) que sujetan la tarjeta de velocidades (63). Para que este cambio sea efectivo se debe cambiar la base negra (38) y la tarjeta de velocidades (63), de manera que puedan ingresar por presión (Figura 33). Así se le implementó al procesador de alimentos el mismo sistema que tiene la licuadora para la perilla de velocidades ya que cumple con la propuesta que se hizo para el procesador de alimentos.

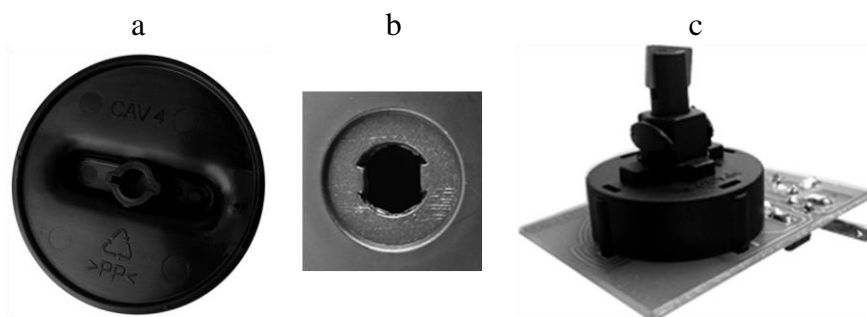


Figura 33. Propuesta de rediseño para la tarjeta de velocidades del procesador de alimentos.
(a) Perilla control de velocidades (62), (b) interfaz para la base negra (38), (c) tarjeta de velocidades (63).

En este punto del proceso, se procedió a construir unas nuevas matrices de interacción para visualizar esquemáticamente las implementaciones que se efectuaron anteriormente. Adicionalmente, estas matrices intermedias facilitan la identificación de las interacciones entre módulos para continuar con el proceso de modularización (Figura 34 y Figura 35).

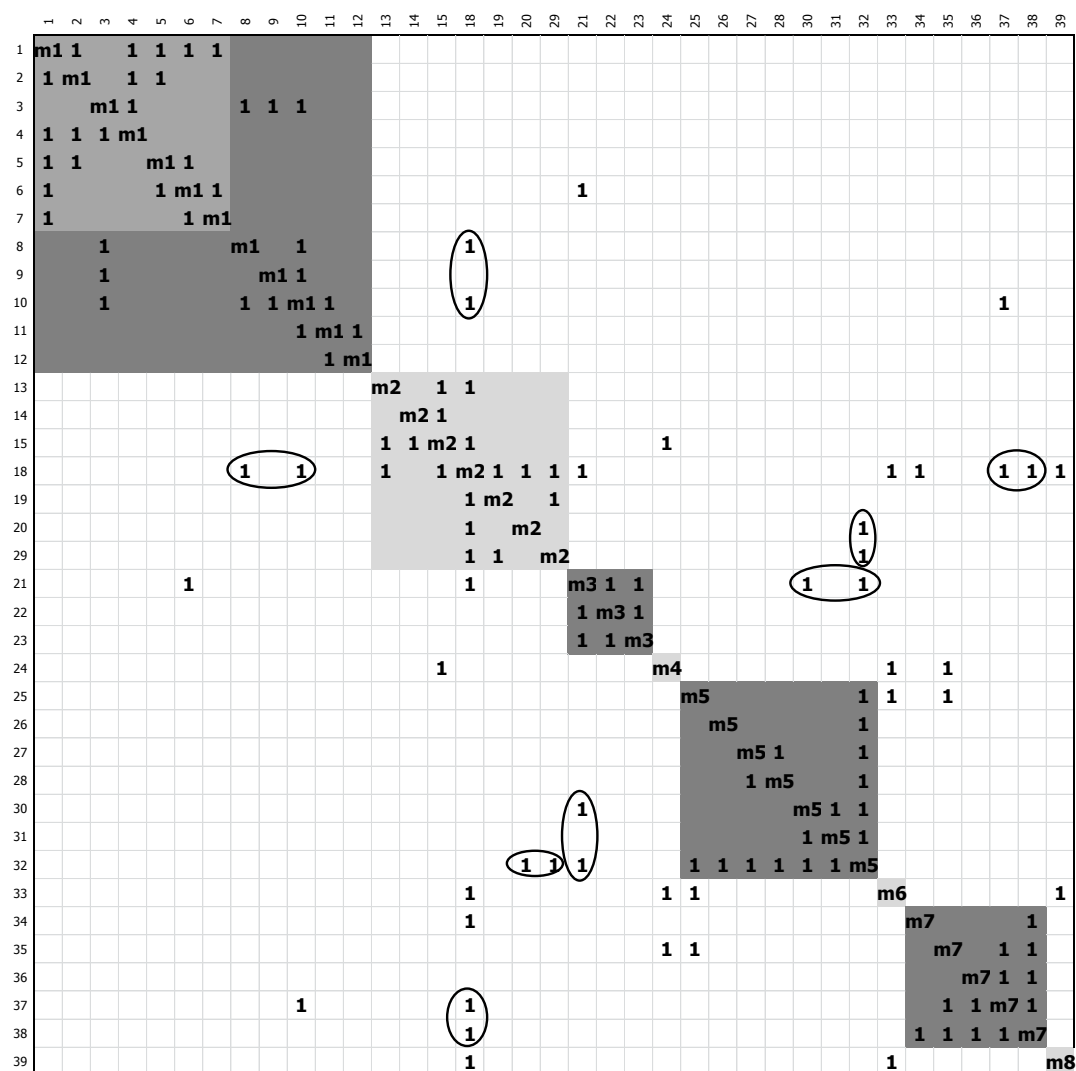


Figura 34. Matriz de interacciones después de realizar cambios en la licuadora

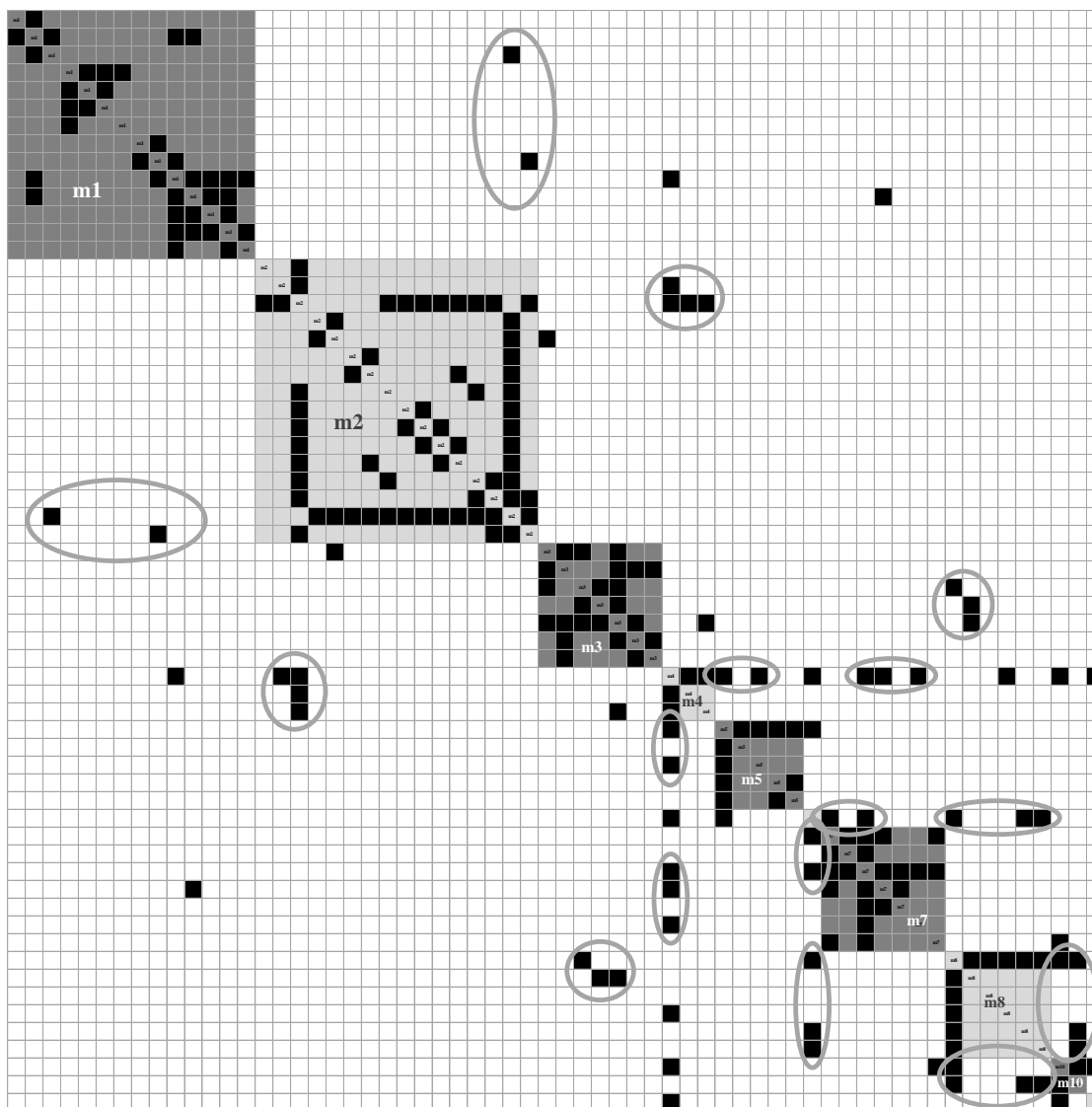


Figura 35. Matriz de interacciones después de realizar cambios en el procesador de alimentos

Por último, partiendo de los módulos que interactúan más de una vez evidenciados en las anteriores matrices (Figura 34 y Figura 35), se procedió a eliminar las interacciones entre módulos. Vale la pena recordar que el análisis de las interacciones de las piezas individuales fue realizada previamente, en esta sección se tendrán en cuenta solo las interacciones entre los diferentes módulos (Tabla 13 y Tabla 14), al terminar este proceso se realizó una nueva matriz que incluye todas las modificaciones realizadas y evidencia un incremento en la modularidad del producto (Figura 39). A continuación se describirán cada una de las modificaciones realizadas en las piezas de la licuadora y el procesador de alimentos para disminuir las interacciones entre los módulos.

Tabla 13. Identificación de las interacciones para la licuadora. Elaboración propia

Módulo	Interactúa más de una vez con	Piezas implicadas
m1	m2	Sujetador tapa inferior (8) con Base (18) Jarra (10) con Base (18)
m2	m5 m7	Empaque apoya motor (20) con Sub ensamble motor (32) Empaque lateral motor (29) con Sub ensamble motor (32) Base (18) con Activador (37) Base (18) con Base seguro (38)
m3	m5	Acople hembra (21) con Empaque eje motor (30) Acople hembra (21) con Sub ensamble motor (32)

Tabla 14. Identificación de las interacciones entre módulos para el procesador de alimentos. Elaboración propia

Módulo	Interactúa más de una vez con	Piezas implicadas
m1	m2	Guía superior eje metálico (3) con eje metálico (29) Soporta cuchilla (9) con eje plástico (30)
m2	m4	Tornillos eje (16) con Base negra (38) Base eje (17) con Base negra (38) Base eje (17) con Cordón de empaque (39) Base eje (17) con Guía de engranajes (40)
m3	m8	Guía eje motor (33) con Sub ensamble motor (56) Arandela Roja (34) con Engranaje eje motor (57) Engranaje plástico (35) con Engranaje eje motor (57)
m4	m5	Base negra (38) con Base gris (41) Base negra (38) con Tornillos para base gris (43)
	m7	Base negra (38) con Base seguro (51) Base negra (38) con Activador de seguro (52) Base negra (38) con Tornillos seguro (54)
m6	m7	Cable de alimentación (46) con Suiche de seguridad (49) Cable de alimentación (46) con Base seguro (51)
	m8	Cable de alimentación (46) con Sub ensamble motor (56) Cable de alimentación (46) con Tapón empate cables (60) Cable de alimentación (46) con Abrazadera cable (61)
m8	m10	Sub ensamble Motor (56) con Tarjeta de velocidades (63) Sub ensamble Motor (56) con Cable rojo (65) Tapón empate cables (60) con Cable rojo (65) Abrazadera cable (61) con Cable rojo (65)

En la licuadora, para generar una sola interacción entre m1 y m2 se modificó el sujetador de tapa inferior (8) haciéndolo 2 cm más alto y así eliminar la interacción entre la jarra (10) y la base (18). Al hacer este cambio, el activador del seguro de la jarra (10) pasó a ser parte del sujetador de la tapa inferior (8), lo cual, además de eliminar las interacciones entre el módulo m1 y m2 (Tabla 13), facilitó destapar la jarra (10) por la parte inferior, aportando dos puntos de apoyo para esta acción. Se debe tener en cuenta que hay que hacer la jarra 2 cm más corta para que las medidas totales del producto no varíen (Figura 36). Otra

variación que puede notarse después de esta modificación, es que el activador de pausa (37) dejó de interactuar con la jarra (10) y pasó a interactuar con el sujetador de la tapa inferior (8), lo que significa que la interfaz entre el módulo m1 y el módulo m2 es más simple.

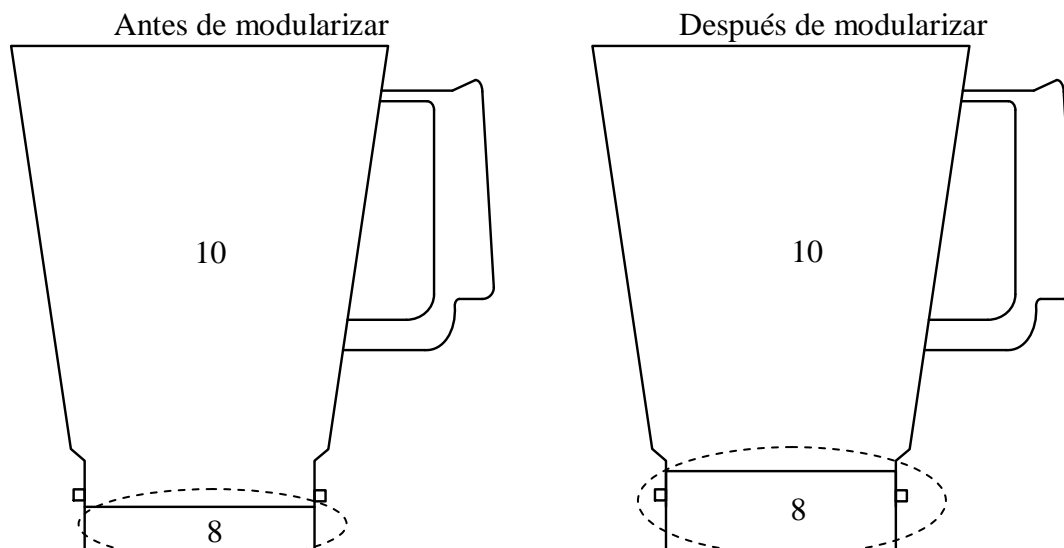


Figura 36. Cambio realizado para disminuir las interacciones entre módulos de la jarra de la licuadora.

Por otro lado, en la jarra de la licuadora se evidenció también que los módulos m2 y m5 tienen dos interacciones, una a través del empaque apoya motor (20) y otra a través de los empaques laterales del motor (29) (Tabla 13). La modificación realizada para lograr una sola interacción fue unificar dichos empaques. Así, al ser el mismo, cumplen las dos funciones y pueden solicitarse pares de empaques iguales en vez de pares de empaques diferentes. Para lograr que los empaques encajen en la cavidad de la base (18) se ajustó al tamaño de los empaques para que estos encajen en ella. Teniendo en cuenta que las piezas iguales se toman como si fueran una sola, se obtiene una sola interacción entre estos dos módulos, así haya cuatro puntos de contacto entre la base (18) y el sub ensamble motor (32) a través de los empaques.

Como el módulo m2 y el módulo m7 también interactuaban más de una vez (Tabla 13), se logró disminuir las interacciones entre estos dos módulos haciendo que la base (18) no fuera la guía del activador de pausa (37), si no que la guía del activador de pausa (37) sea la base del seguro (38), la cual es su propia base. Por otra parte, Las interacciones entre m3 y m5 involucran relaciones indispensables para el funcionamiento de la licuadora, como son el acople hembra (21) con el empaque eje motor (30) y el eje del sub ensamble motor (32), por lo tanto no es posible, en este caso, intervenir en estos puntos el producto.

Al evaluar cada una de las interacciones entre módulos del procesador de alimentos (Tabla 14) se evidenció que todas las interacciones son fundamentales para el funcionamiento del procesador por lo que no se propusieron cambios en estas.

Luego de que se implementaron los cuatro pasos mencionados, se hizo un análisis desde el ensamble de los productos y se combinaron algunos módulos para facilitar el ensamble. En el caso de la licuadora, se combinaron los módulos m4, m5, m6 y m7 y se generó un único

módulo compuesto por toda la parte eléctrica de la licuadora. Para el procesador de alimentos se combinaron los módulos m4, m5, m6, m7, m8 y m10 y se generó un único módulo compuesto por toda la parte eléctrica del procesador de alimentos más la base negra (38).

Luego de la eliminación de las interacciones entre módulos se procedió a la creación de nuevos módulos. Para entender la nueva matriz de interacciones, los módulos resultantes después de implementar todos los cambios se denotaron con la letra “M” en ambos productos. Los nuevos módulos fueron compuestos por los anteriores de la siguiente manera: para la licuadora m1 se convirtió en M1; m2 en M2; m3 en M3; m4, m5, m6 y m7 en M4 y m8 en M5 (Figura 39). Para el procesador de alimentos m1 se convirtió en M1; m2 en M2; m3 en M3; m4, m5, m6, m7, m8 y m10 en M4 y m9 en M5 (Figura 40). Teniendo en cuenta, que el objetivo de esta investigación es hacer el producto lo más modular posible, en este caso se hace evidente que el módulo base M2 de la licuadora, al igual que el módulo M4 en el procesador de alimentos, no pueden tener una sola interacción debido a su funcionalidad. Esta característica no es la única que dificulta la modularización de un producto, es preciso tener en cuenta que un módulo de gran tamaño y/o con muchas piezas será más difícil de modularizar.

Después de la identificación de piezas, el intercambio de filas y la eliminación de piezas en función de la matriz de interacción, se puede concluir que la implementación de los cambios descritos incrementó la modularidad de la licuadora en un 27,78% e incrementó la modularidad del procesador de alimentos en un 59,46% (porcentajes calculados como se explica en el capítulo 2 con la ecuación (1)).

Luego de aplicar el proceso anterior, se obtuvo un producto más simple, en él que las interacciones entre módulos han disminuido significativamente (Figura 43 y Figura 44). Así mismo, el índice de modularidad de valor singular (SMI) aplicado a las matrices de interacción antes de aplicar la modularidad (Figura 23 y Figura 25) y después (Figura 34 y Figura 35), muestra que la matriz resultante es más modular en ambos productos al tener un índice de valor 0,167 para la licuadora y 0.096774 para el procesador de alimentos. En ambos casos estos valores son más cercanos a 1 que el índice de la matriz inicial el cual tenía un valor de 0,154 para la licuadora y de 0.092308 para el procesador de alimentos¹⁹.

Finalmente, para encontrar las funciones de cada módulo se analizó cada módulo por separado, teniendo en cuenta lo registrado en la Tabla 1 para identificar las funciones correctas. Las funciones por módulo, de la licuadora y del procesador de alimentos, se consignaron en las Tabla 15 y Tabla 16 respectivamente.

¹⁹ Se puede encontrar en la bibliografía que el índice SMI puede ser usado para medir la modularidad (Hölttä-Otto & De Weck, 2007), sin embargo vale la pena aclarar que dicho índice es altamente dependiente del tamaño de la matriz, lo que implica que no puedan compararse dos matrices de diferente tamaño y que entre más grande sean las matrices los valores de SMI siempre tenderán a cero.

Tabla 15. Función por módulo de la licuadora

Módulo	Funciones
M1	Contener materia
M2	Sostener y alinear
M3	Transferir velocidad angular
M4	Convertir energía eléctrica en energía cinética rotacional
M5	Amplificar fuerza humana

Tabla 16. Función por modulo del procesador de alimentos

Módulo	Funciones
M1	Contener materia
M2	Transferir velocidad angular
M3	Amplificar Torque y disminuir la velocidad angular
M4	Convertir energía eléctrica en energía cinética rotacional
M5	Amplificar fuerza humana

3.1.2.2 Modificaciones al desensamble y al ensamble después de modularizar

En esta sección se obtendrán las salidas de la etapa de análisis modificadas con los cambios realizados en proceso de modularización realizado previamente. Empezando con la lista de piezas (Figura 37 para la licuadora y Figura 38 para el procesador de alimentos) y continuando con la matriz de interacción luego de modularizar Figura 39 para la licuadora y Figura 40 para el procesador de alimentos). El análisis funcional no se tendrá en cuenta, ya que cuando se aplicaron los pasos para modularizar no se afectó en absoluto.

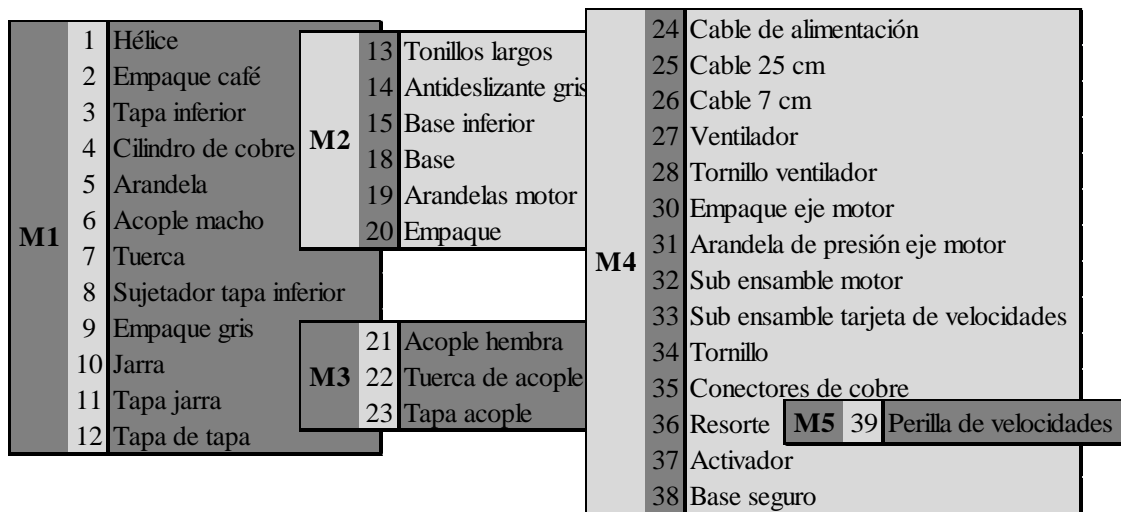


Figura 37. Módulos resultantes después de modularizar
Nuevo desensamble de la licuadora

M1	1	Empujador de alimentos	M2	15	Tapa tornillo eje	M4	38	Base negra
	2	Tapa Jarra		16	Tornillo Eje		39	Cordon de empaque
	3	Guia superior de eje metalico		17	Base eje		40	Guia engranes
	4	Rallador Circular		18	Pin de engrane		41	Base gris
	5	Cuchilla Rebanadora		19	Engrane macho metalico		42	Antideslizantes
	6	Remaches		20	Pin candado		43	Tornillos para base gris
	7	Guia media de eje plastico		21	Arandela naranja		44	Ventosas
	8	Cuchilla pica todo		22	Cilindro superior		45	Tornillos para ventosas
	9	Soporta cuchilla		23	Cilindro inferio		46	Cable de alimentación
	10	Jarra		24	Arandela gris		49	Suiche de seguridad
	11	Activador de seguro jarra		25	Arandela de cobre		50	Tornillo suiche
	12	Resorte jarra		26	Arandela blanca		51	Base seguro
	13	Tapa seguro		27	Arandela larga		52	Activador de seguro
	14	Tornillos		28	Empaque eje		53	Resorte
M3	31	Base de engranaje	M5	62	Perilla control velocidades		54	Tornillo seguro
	32	Eje engrane plastico					55	Cable Blanco
	33	Guia eje motor					56	Subensamble motor
	34	Arandela roja					57	Engrane eje motor
	35	Engrane plastico					58	Ventilador
	36	Arandela naranja					59	Tornillos sujeta motor
	37	Pin candado					60	Tapón empate cables
							61	Abrazadera cable
							63	Tarjeta de velocidades
							65	Cable rojo

Figura 38. Módulos resultantes después de modularizar
Nuevo desensamble del procesador de alimentos

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
1	M1	1					1	1	1	1	1																													
2	1	M1						1	1																															
3			M1	1							1	1	1																											
4	1	1	1	M1																																				
5	1	1			M1	1																																		
6	1					1	M1	1													1																			
7	1						1	M1																																
8								1			M1		1					1																						
9									1			M1	1																											
10									1			1	1	M1	1																									
11													1	M1	1																							1		
12													1	M1																										
13														M2		1	1																							
14															M2	1																								
15																1	1	M2	1						1															
16																																								
17																																								
18								1																															1	1
19																																								
20																																								
21																																								
22																																								
23																																								
24																																								
25																																								
26																																								
27																																								
28																																								
29																																								
30																																								
31																																								
32																																								
33																																								
34																																								

Figura 39. Matriz de interacciones después de modularizar la licuadora.
La letra “M” denota los nuevos módulos después de modularizar.

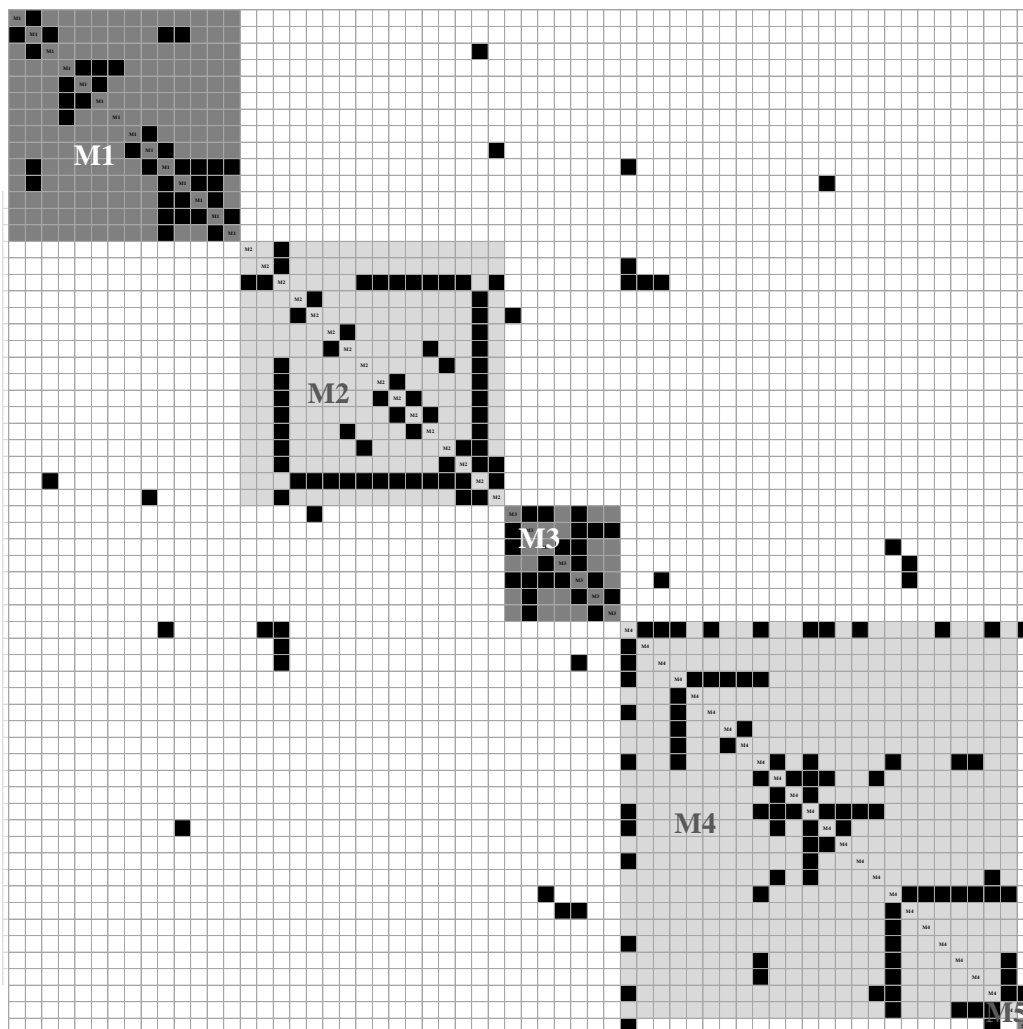


Figura 40. Matriz de interacciones después de modularizar el procesador de alimentos. Los módulos finales se denotaron con la letra “M”.

A continuación se realizaron dos diferentes tipos de esquemas antes y después de modularizar los productos, como complemento de las matrices de interacción. En dichos esquemas se evidencia claramente las interacciones entre módulos y sus modificaciones después de la modularización. Debido a que estos esquemas no se explicitaron detalladamente en el proceso de análisis, se presentarán en esta sección para poder pasar a la última etapa, que es la etapa comparativa.

El primer tipo de diagrama que se presenta es una versión simplificada de las matrices de interacción antes y después de modularizar para los dos productos (Figura 41) y (Figura 42). Puede observarse en estos diagramas, que en la primera fila y en la primera columna, se muestran los nombres de los módulos, las casillas grises dentro de las matrices corresponden a los módulos, y los números de la matriz en las casillas blancas corresponden a la cantidad de interacciones que hay entre módulos. A la izquierda está la matriz antes de la modularización, y a la derecha está la matriz después de la modularización para la licuadora y en el caso del procesador de alimentos, se presenta la matriz antes de modularizar arriba y después de modularizar abajo.

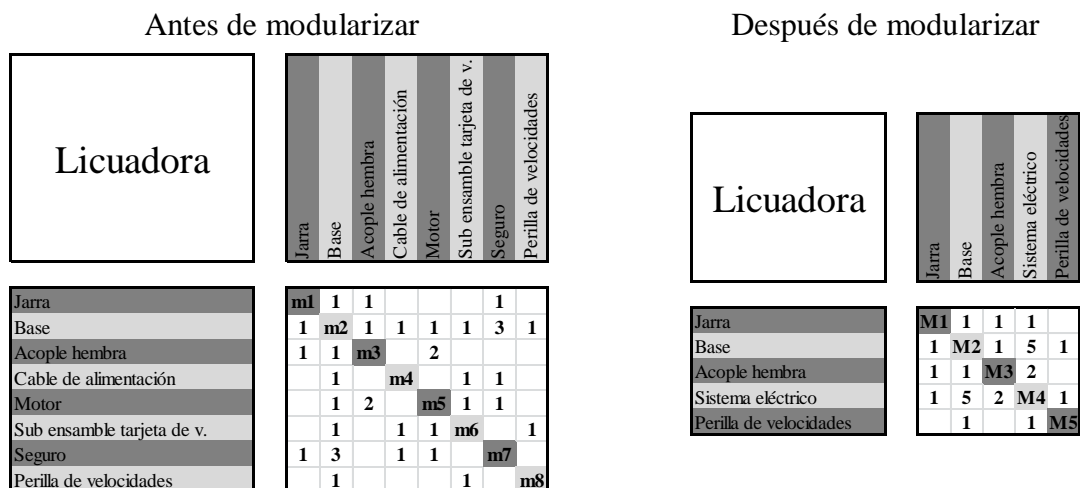


Figura 41. Comparación simplificada de las matrices antes y después de modularizar la licuadora.

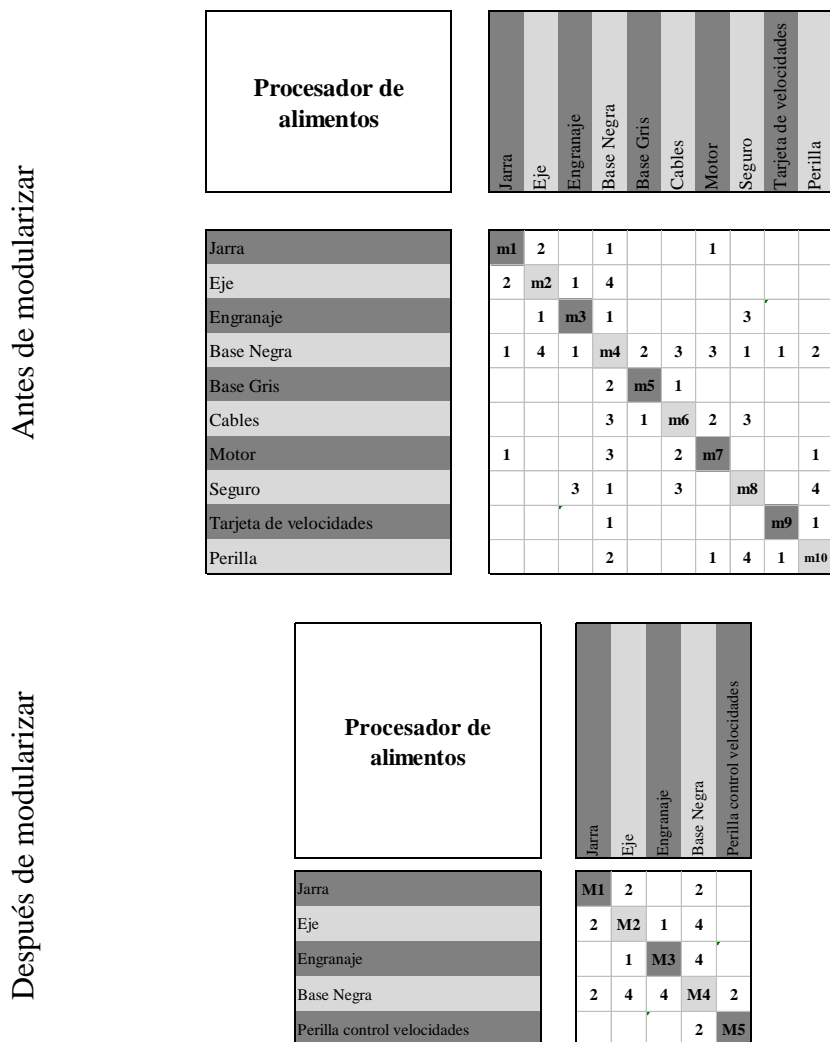


Figura 42. Comparación simplificada de las matrices antes y después de modularizar el procesador de alimentos.

Para ver mejor como se simplifican las interacciones, se realizó también otro tipo de esquema, el segundo tipo mencionado anteriormente, en los cuales se puede apreciar la potencia procedimental implicada en la modularización de productos ya existentes. En estos esquemas, los cuadros representan los módulos y las líneas que unen los cuadros las interacciones. A la izquierda se presenta el esquema antes de modularizar y a la derecha después de modularizar para la licuadora. Para el procesador de alimentos se presenta el esquema antes de modularizar arriba y abajo después de modularizar.

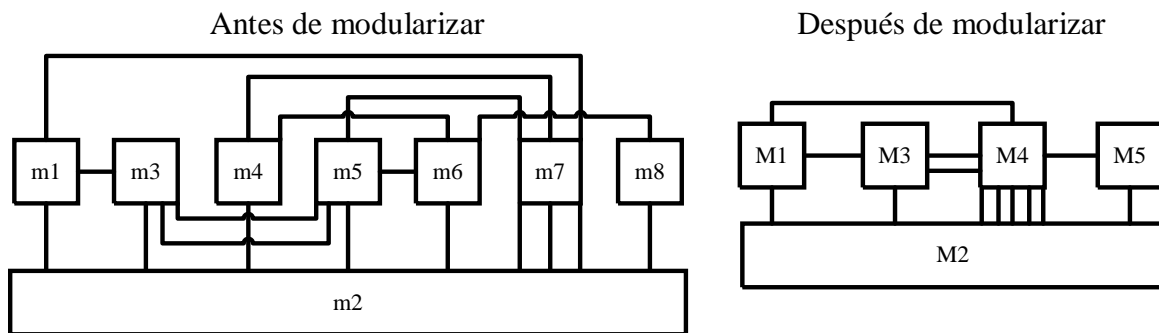


Figura 43. Comparación de interacciones entre módulos para la licuadora.

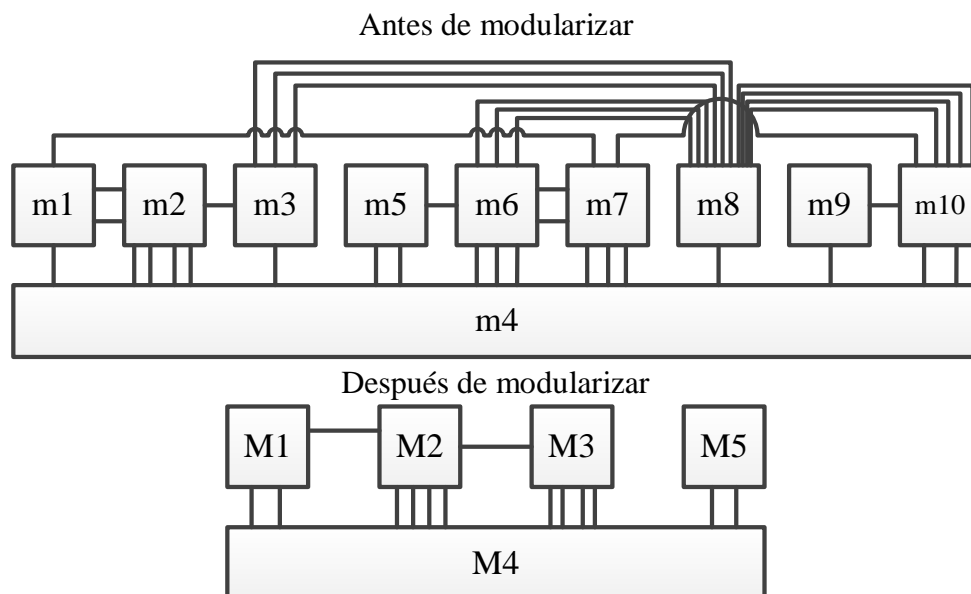


Figura 44. Comparación de interacciones entre módulos para el procesador de alimentos.

3.1.2.2.1 Medición de tiempos de ensamble antes y después de la modularización

Para validar los cambios realizados en los productos se midieron los tiempos de ensamble en ambos electrodomésticos originales (Tabla 17 y Tabla 19), se estimaron las reducciones que los cambios propuestos producen, y finalmente, se compararon ambos resultados. Para la licuadora las reducciones temporales se produjeron en los módulos M1, M2 y en el ensamble de M4 en M2, por lo que son estos módulos los que se tuvieron en cuenta. Para el procesador de alimentos los cambios se produjeron solo en M4.

Para la medición de los tiempos de ensamble, todos los elementos de ambos productos se dispusieron cerca del área de trabajo, obedeciendo a nuestra suposición inicial de que las

piezas no ameritan un almacenaje lejos de esta área debido a su peso y su tamaño. Para que estos tiempos fueran cercanos a los tiempos que un operario puede alcanzar, se promedió el tiempo de los últimos seis ensamblajes (Tabla 17 y Tabla 19). Y para poder compararlos con los obtenidos en el proceso de modularización, se separaron los tiempos por módulos.

En nuestros dos casos de estudio, se estimó un cálculo teórico de los tiempos de ensamble para toda la parte eléctrica basándonos en la teoría de DFA del libro *Product Design For Manufacture and Assembly*, y se utilizó el tiempo experimental (EXP) presentado en las gráficas de dicho libro. (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002, págs. 160-162) (Tabla 18 y Tabla 20).

Tabla 17. Tiempos de ensamble por módulo para la licuadora.

Modulo	Tiempo (s)
m1	49,07
m2	33,97
m3	20,72
m4	214,60
m5	
m6	
m7	
m8	-
m4 en m2	150,20
m3 en m2M4	40,50
m8 en m4	19,89
Total (s)	528,95

Tabla 18. Tiempo de ensamble para la parte eléctrica de la licuadora.

El tiempo calculado en esta tabla se obtiene según el tiempo experimental (EXP) presentado en las gráficas del libro *Product design for manufacture and Assembly* (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002)

Operaciones	Tiempos (s)	# de cables	Tiempo total (s)
Pelar el cable	7	12	84
Soldar	9	8	72
Prensado	13,9	4	55,6
Total			211,6

Tabla 19. Tiempos de ensamble por módulo para el procesador de alimentos

m	tiempo (s)
m1	82,65
m2	106,41
m3	170,81
m4	57,00
m5	551,06
m6	
m7	
m8	
m9	
m10	

Tabla 20. Tiempo de ensamble para la parte eléctrica del procesador de alimentos.

El tiempo calculado en esta tabla se obtiene según el tiempo experimental (EXP) presentado en las gráficas del libro *Product design for manufacture and Assembly* (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002)

Operaciones	Tiempos	# de cables	Tiempo total s
Pelar el cable	7	12	84
Soldar	9	4	36
Prensado	13,9	2	27,8
Total			147,8

Para tener claridad de los cambios propuestos y como es la reducción de los tiempos de ensamble en ambos productos se detallará a continuación los cambios de cada producto por separado. Evaluando los ajustes que se hicieron para que sea más modular el producto se obtuvieron los siguientes resultados en la reducción del tiempo de ensamble:

Cambios para la licuadora

Primer cambio: eliminación del sujeta cable (16) y de los dos tornillos sujeta cables (17)

La eliminación de estas tres partes significa que los 2 tornillos y la abrazadera que componen el sujeta cable (17) no tienen que apretar el cable (16). Esto implica una reducción de 23.63% en el tiempo total de ensamble. Al realizar este cambio, la función de la abrazadera del cable se integró a la base inferior (15), modificando el molde de inyección para hacer una ranura de lados paralelos en una pequeña parte de la base inferior (15) y se ató un nudo en el cable de alimentación (24) que permitió mantener el cable a través de él (Figura 32).

Segundo cambio: modificación de los empaques laterales del motor (29) y su forma de ensamble a la base

La modificación de los empaques laterales del motor (29), y su ensamble en la base (18) redujo el total del tiempo de ensamble en dos segundos, lo que supuso una disminución de un 5,89%.

Tercer cambio: extensión de las paredes del sujetador de la tapa inferior (8) y traslado del activador de seguro de la jarra al mismo sujetador

Hacer más altas las paredes del sujetador de la tapa inferior (8) y pasar el activador de seguro de la jarra al sujetador de la tapa inferior, implica modificar los moldes de inyección. Sin embargo, este cambio facilita de manera determinante el ensamble del sujetador de la tapa inferior (8) a la jarra (10) e incrementa los beneficios, no solo para el operario, sino también para el usuario de la licuadora. Dicho incremento en la facilidad de ensamble se valoró en una reducción de un segundo, es decir, disminuye el 2,04% el tiempo de ensamble en esta operación.

Cuarto Cambio: unificación de empaques

Al volver los empaque iguales no se tiene que perder tiempo definiendo que empaque utilizar y donde ponerlo, simplemente se toma cualquiera de los empaques disponibles y se ubica donde se necesita. Este procedimiento reduce tres segundos el tiempo total de ensamble, lo que equivale a una disminución del 8,83%.

Después de realizar los cuatro cambios descritos se obtuvo una reducción en el tiempo de ensamble del 8,70% por cada licuadora ensamblada (Tabla 21). Esto significa un aumento en la producción de licuadoras y por supuesto, un aumento en la fuerza de ventas de la empresa manufacturera. Dicho de otra forma, si un solo operario trabaja ocho horas diarias ensamblando licuadoras, se obtendría un aumento de 5 licuadoras diarias, lo que equivaldría a un aumento de 1820 licuadoras en un año por operario.

Tabla 21. Reducciones de tiempos de ensamble y de ensamble total para la licuadora modularizada.

Modulo	Tiempo de ensamble s	% de disminución por módulos
M1	48,07	2,04%
M2	28,97	14,72%
M3	20,72	
M4	214,60	
M5	-	
M4 en M2	110,20	26,63%
M3 en M2M4	40,50	
M5 en M4	19,89	
Total s	482,95	8,70%

Cambios para el procesador de alimentos

Primer cambio: eliminación del pisa cable de alimentación (47) y de los dos Tornillos pisa cable de alimentación (48)

Con la eliminación de estas tres piezas se puede reducir el tiempo de ensamble en un 7,45% con respecto a su propio modulo, tiempo que corresponde a no tener que apretar 2 tornillos (48) y posicionar el pisa cable de alimentación (47). Al realizar este cambio la función del sujeta cable se integró a la base negra (38), modificando el molde de inyección para realizarle un orificio ovalado a una pequeña parte de la base negra (38) y así poder sujetar el cable a través de él (Figura 32).

Segundo cambio: eliminación de dos de tres tornillos de seguro (54)

La eliminación de estos dos de tres tornillos permitió reducir el tiempo de ensamble en un 5,41% con respecto a su propio módulo.

Tercer cambio: Eliminación de los tornillos (64) que sujetan la tarjeta de velocidades (63)

Al eliminar los dos tornillos que sujetan la tarjeta de velocidades se logró reducir el tiempo en un 11,52% con respecto a su propio módulo.

Después de realizar los tres cambios descritos, se obtuvo una reducción en el tiempo de ensamble del 24,22% por cada procesador de alimentos ensamblado (Tabla 22). Esto significa un aumento en la producción de procesadores de alimentos y por supuesto, un aumento en la fuerza de ventas de la empresa manufacturera. Dicho de otra forma, si un solo operario trabaja ocho horas diarias ensamblando procesadores de alimentos, se obtendría un aumento de 9 Procesadores de alimentos diarios, lo que equivaldría a un aumento de 3285 procesadores de alimentos en un año por operario.

Tabla 22. Reducciones de tiempos de ensamble y de ensamble total para el procesador de alimentos modularizado.

Modulo	Tiempo de ensamble s	% de disminución por módulos
M1	82,65	
M2	106,41	
M3	170,81	
M4	483,67	24,37%
M5	2,00	
Total	845,54	24,22%

3.1.2.2.2 Eficiencia de diseño y eficiencia de ensamble

Para poder calcular la eficiencia de ensamble y la eficiencia de diseño se hizo una revisión a la clasificación de piezas que al final no cambió. Como ya se explicó, las piezas tipo A teóricamente no son susceptibles a cambios, y fue así como efectivamente ocurrió en los dos ejemplos ilustrativos que presentamos en esta investigación. Lo que sí disminuyó fue el número total de piezas en ambos productos, por lo que los índices aumentan sus valores de la siguiente manera: para la licuadora, el índice de diseño quedó después de modularizar en 64,58% y el índice de ensamble en 32,09%, y para el procesador de alimentos, el índice de diseño después de modularizar quedó en 34,04% y la eficiencia de ensamble en 11,35%.

3.1.2.2.3 Diagrama de operaciones después de modularizar

Al analizar el diagrama de operaciones de ambos productos antes de modularizar, se evidenció que los módulos iniciales se intersectan entre sí, lo que demuestra que el ensamble no se puede llevar a cabo por módulos (Figura 28 y Figura 29). A partir de este análisis, se propuso, para la licuadora, un solo módulo independiente que se nombró M4, formado a partir de la combinación de m4, m5, m6, m7, y para el procesador de alimentos, un solo módulo independiente nombrado M4, formado a partir de la combinación de m4, m5, m6, m7 m8 y m10, (Figura 28 y Figura 29), como se explicó anteriormente. Esto reduce la complejidad de los productos, disminuye las interacciones entre módulos y permite ensamblar todo el sistema eléctrico en un solo modulo.

Además de proponer un producto con la posibilidad de ensamblarse por módulos, incrementando la eficacia de tiempo y espacio de la planta de producción, con la eliminación de las piezas 16, 17 y 20 para la licuadora, se eliminaron las operaciones 36, 37 y 26. Para el procesador de alimentos la eliminación de las piezas 64, 47 y 48 condujo a la eliminación de las operaciones 34, 35 y 36. Esto aumentó considerablemente la facilidad de ensamble de ambos productos.

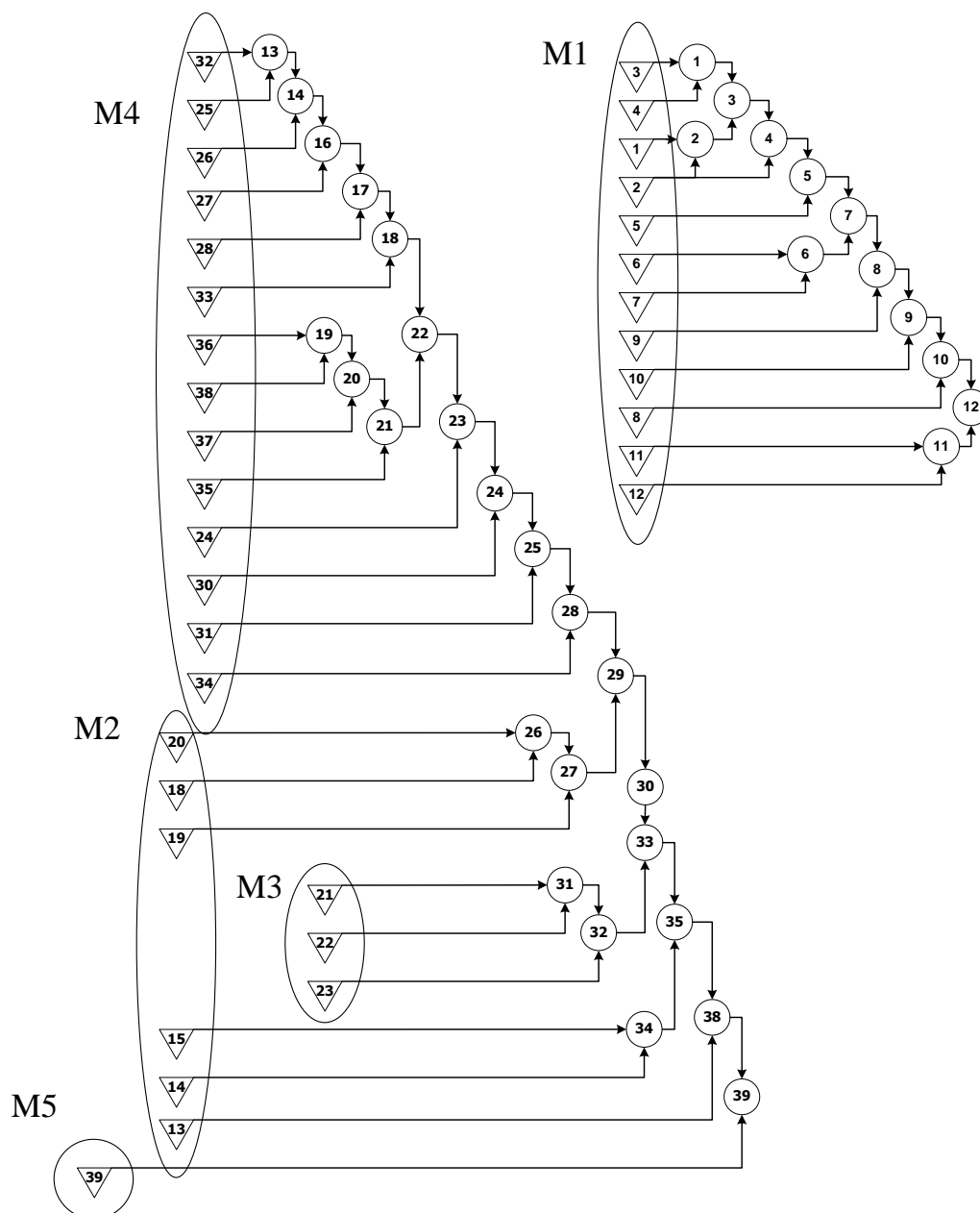


Figura 45. Diagrama de operaciones de la licuadora después de modularizar

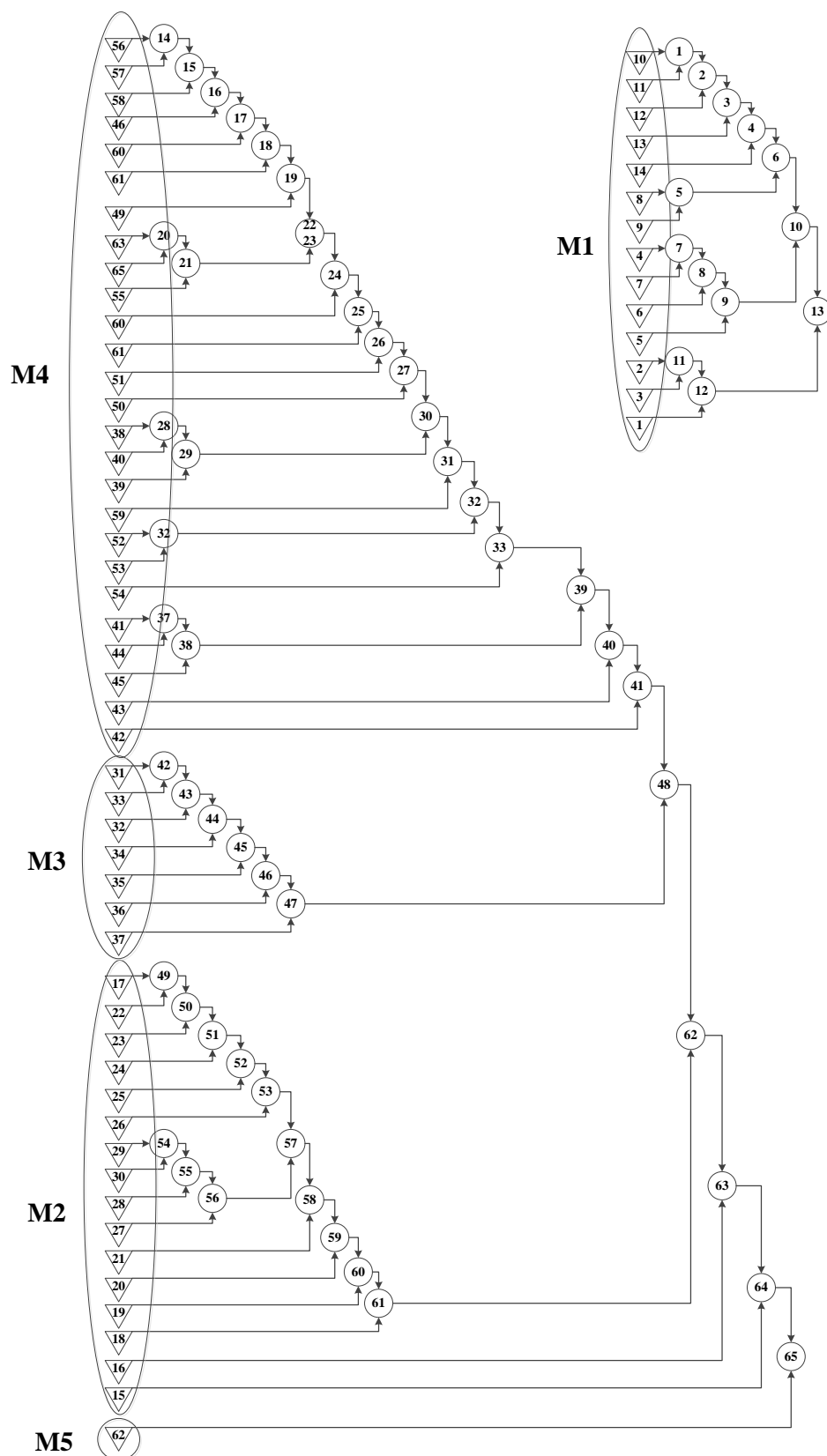


Figura 46. Diagrama de operaciones del procesador de alimentos después de modularizar

3.1.2.3 Distribución de planta en el proceso de ensamble

Como parte final de esta etapa se propuso redistribuir la planta según el proceso de ensamble y los nuevos módulos propuestos. Como punto de partida para la licuadora, se consideró una distribución de planta inicial con dos puestos de trabajo, uno para ensamblar la jarra m1 y otro para ensamblar el resto de la licuadora (m2, m3, m4 y m5). Mientras que para el procesador de alimentos, se consideró una distribución de planta inicial con tres puestos de trabajo, uno para ensamblar la jarra m1, otro para ensamblar el sistema eléctrico m4 y otro para ensamblar el resto del procesador de alimentos (m2, m3, m5). La distribución de planta propuesta se hizo de acuerdo a los módulos iniciales que se escogieron. Esta distribución de planta inicial produce un total de sesenta licuadoras al día, según la velocidad de ensamble del puesto de trabajo más lento, éste es el que opera con los módulos de m2 a m8, que tarda 479,88 segundos para su ensamble (Figura 47, inicial). Al mismo tiempo, para el procesador de alimentos, la distribución de planta inicial produce un total de cincuenta y dos procesadores de alimentos al día, según la velocidad de ensamble del puesto de trabajo más lento, que es el que opera con los módulos de m5 a m10, que tarda 551,06 segundos para su ensamble (Figura 48, inicial).

Como ya se tiene conocimiento de cuáles son los módulos y se tiene el tiempo por módulo después de modularizar se pueden proponer varias distribuciones de planta para la licuadora como por ejemplo una formación de 3 operarios donde se ensamble el M1 por un lado y se ensambren el resto de módulos en dos puestos de trabajo secuenciales (Figura 47, 1), con esta nueva distribución de planta tenemos un aumento en la velocidad de producción del 116,67%, ya que el puesto de trabajo más lento es 259,60 segundos más rápido que el módulo más lento en la distribución inicial. En cambio para el procesador de alimentos, se implementó una formación de cuatro operarios, en donde el módulo M4 lo ensambren solo dos de ellos. Esta división en dos del puesto de trabajo más lento permitió un aumento del 98,08%, es decir, 241,84 segundos más rápido que el ensamble con la distribución inicial (Figura 48, 1).

El diseño modular, y específicamente el haber creado módulos en el producto permitió hacer diferentes distribuciones en la planta para seleccionar la mejor opción, ensamblar productos más eficientemente y lograr un mayor incremento en la productividad. Por ejemplo, para la licuadora una formación de cuatro operarios en donde los módulos M2, M3 y M4 los ensambren solo dos de ellos, permitiría un aumento del 123% comparado con la distribución inicial (Figura 47, 2). Dicha configuración, se podría maximizar optimizando el tiempo de trabajo de los operarios. Si el operario del módulo más rápido, que en este caso es M1, ayudase en el ensamble de M4 luego de terminar el ensamble de 217 jarras, se incrementaría el número de licuadoras diarias a 217. Expresado en horas de trabajo, si se trabajase por tres horas en la formación 2 y por 5 horas en la formación 3 se tendría un aumento del 262% en la producción diaria de licuadoras (Figura 47, 3).

En el procesador de alimentos, la configuración de la Figura 48,1 también se podría maximizar optimizando el tiempo de trabajo de los operarios. Si el operario del módulo más rápido, que en este caso es M1, ayudase en el ensamble de M4 luego de terminar el ensamble de 118 jarras, se incrementaría el número de procesadores de alimentos diarias a 118. Expresado en horas de trabajo, si se trabajase por un poco menos de tres horas en la

formación 2a y por 5 horas en la formación 2b se alcanzaría un aumento del 126,92% en la producción diaria de procesadores de alimentos (Figura 48, 2). Por último, para optimizar más el uso de los módulos, se propone trabajar en tres formaciones diferentes. La primera sería la formación 1 hasta que el operario de M1 hiciese 134 jarras (Figura 48, 3a), luego el operario del módulo M1 pasaría al módulo M4, hasta que entre los tres operarios que están ensamblando el módulo M4 cumplan una cuota de 98 procesadores de alimentos (Figura 48, 3b), y finalmente, uno de los operarios del módulo M4 pasaría al puesto de trabajo para ensamblar M2, M3 y M5, quedando dos operarios para ensamblar el módulo M4 y dos para el resto de los módulos (Figura 48, 3c). Esta última formación incrementaría la producción a 134 procesadores de alimentos diarios, lo que corresponde a un 157,69% más procesadores de alimentos diarios comparado con la formación inicial.

Todo lo anterior evidencia cuantitativamente cómo el rediseño modular tiene altas implicaciones en la optimización del tiempo de ensamble, el aprovechamiento del área de trabajo, la eliminación de reprocesos, la flexibilidad de la empresa y por tanto en la productividad de esta.

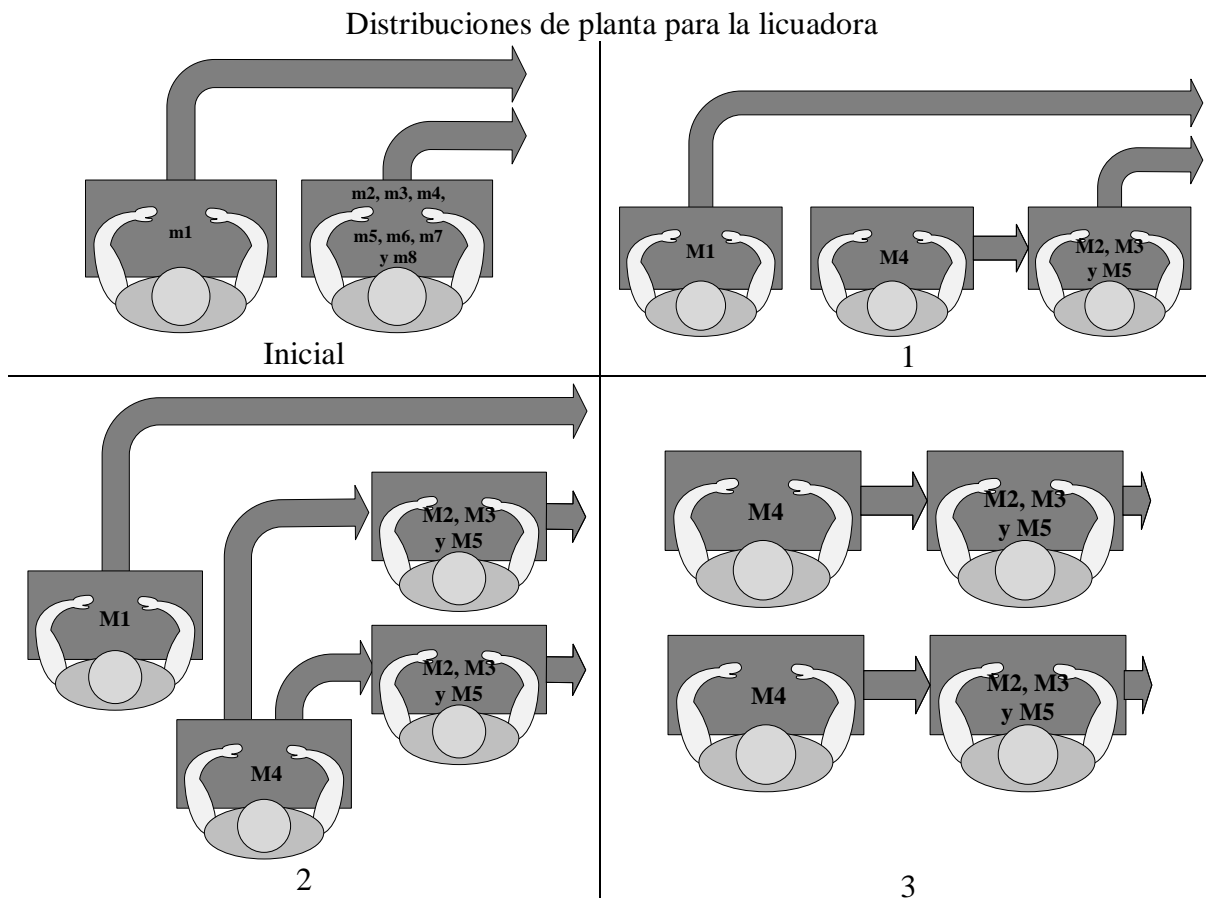


Figura 47. Distribución de planta para la licuadora antes (“m”) y después (“M”) de modularizar
El rediseño modular de un producto el rediseño de la distribución de planta que aumenta la productividad

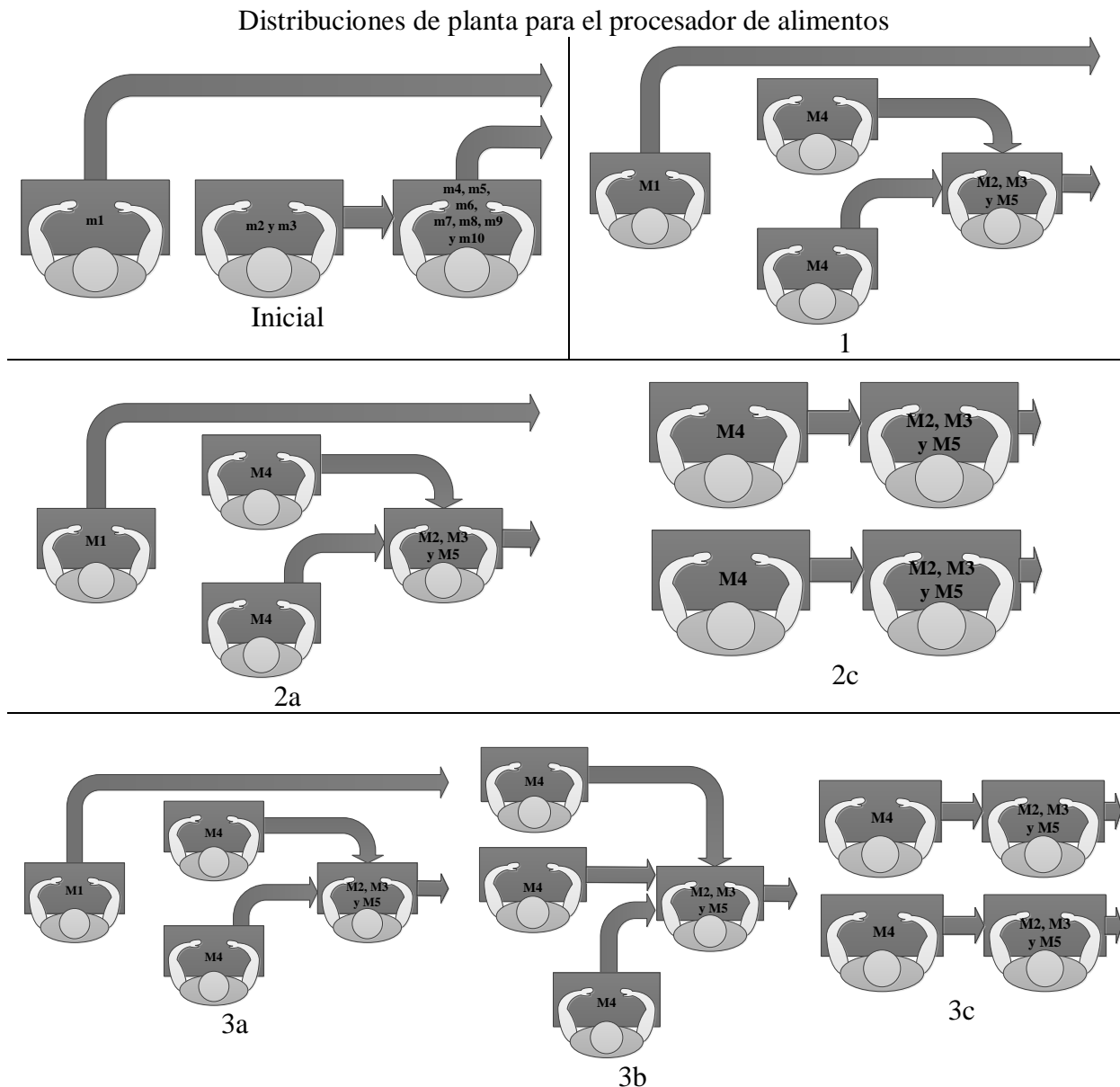


Figura 48. Distribución de planta para el procesador de alimentos antes (“m”) y después (“M”) de modularizar.

Con la finalización de esta etapa se tiene el proceso de modularización casi completo, se obtuvieron como resultado los módulos rediseñados, las funciones principales por módulo rediseñado, el tiempo de ensamble y la distribución de planta para el producto modularizado. Estas salidas de la etapa tienen la particularidad de que también son salidas de la primera fase y se utilizarán en la fase 2 y en la fase 3 para obtener la similitud entre módulos y generar una distribución de planta para la familia de productos respectivamente. Como salidas de la etapa, internas a la primera fase, tenemos EE2, DO2, MI2, AF2, ED2 y LP2, fundamentales para pasar a la última etapa de esta fase.

3.1.3 Etapa comparativa: después del proceso de modularización

En esta última etapa, la idea es comparar las medidas que se obtuvieron en la primera etapa y en la segunda etapa para dar validez al proceso de modularización que se realizó. En esta etapa las entradas son las salidas de la etapa 1, y las salidas de la etapa 2 con su respectiva etiqueta dependiendo de la etapa, un 1 si es de la etapa 1 y un 2 si es de la etapa 2, como se ve en la Figura 49. Como salida importante de esta etapa se obtuvo el producto modularizado.

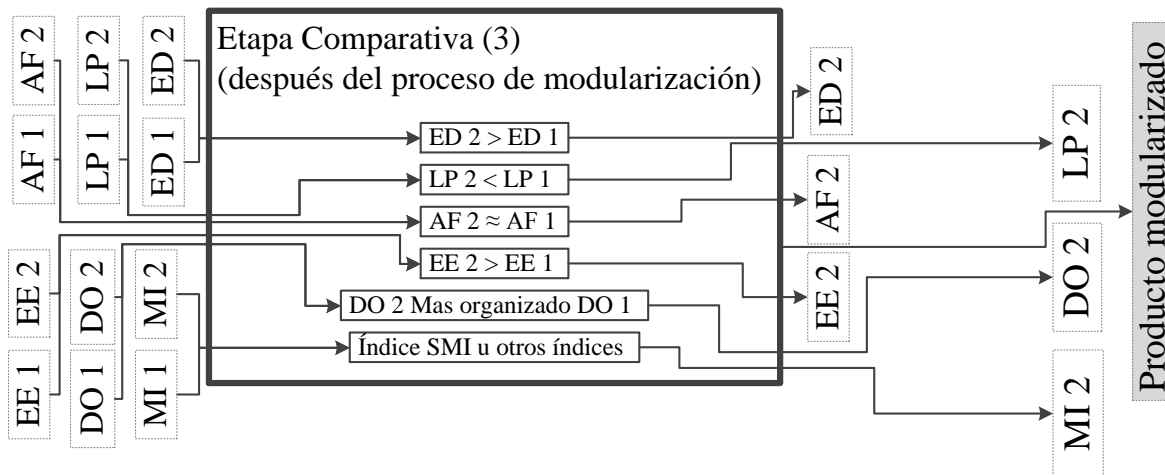


Figura 49. Etapa comparativa (Fase 1). Elaboración propia

Cuando se calcularon los índices para la eficiencia de diseño y para la eficiencia de ensamble antes y después de la modularización de ambos productos, se notó en el caso de la licuadora un aumento del 2,79% para la eficiencia de diseño y 3,80% para la eficiencia de ensamble, y para el procesador de alimentos se obtuvo un 2,36% para la eficiencia de diseño y un 2,75% para la eficiencia de ensamble. Dichos aumentos validan los cambios realizados en los productos y los representamos comparativamente en las figuras a continuación, en las cuales se puede evidenciar que los cambios realizados en ambos productos en función del diseño para el ensamble con una perspectiva modular incrementaron la eficiencia de diseño y la eficiencia de ensamble (Figura 50, Figura 51, Figura 52, Figura 53).

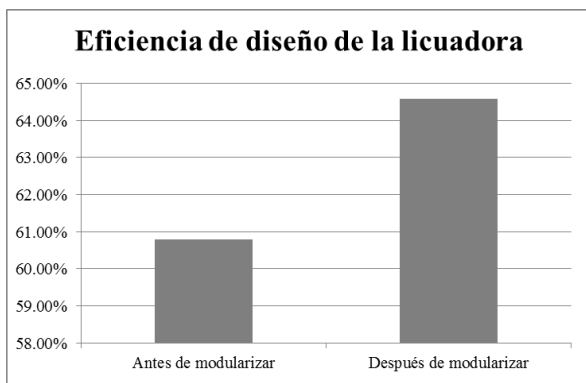


Figura 50. Eficiencia de diseño antes y después de modularizar.

Se evidencia un aumento del 2,79%

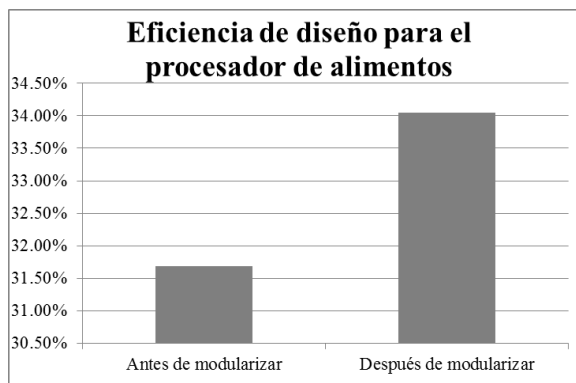


Figura 51. Eficiencia de diseño antes y después de modularizar.

Se evidencia un aumento del 2,36%

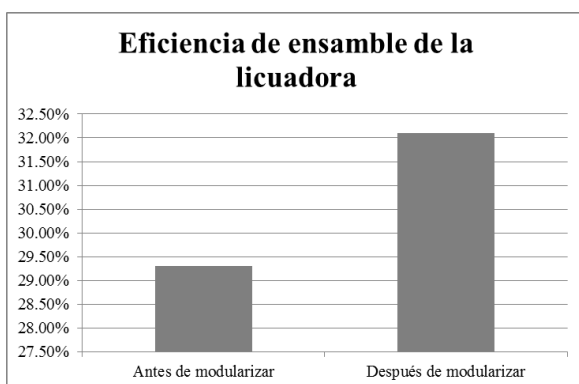


Figura 52. Eficiencia de ensamble antes y después de modularizar.

Se evidencia un aumento del 3,8%.

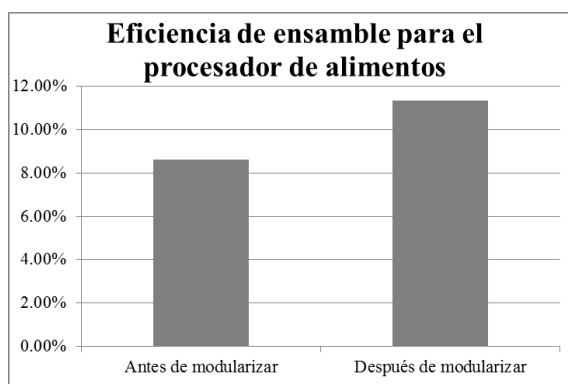


Figura 53. Eficiencia de ensamble antes y después de modularizar.

Se evidencia un aumento del 2,75%.

Otro indicador que se puede calcular teniendo en cuenta los tiempos de ensamble, es el número de productos que se ensamblan diariamente, que como se puede apreciar en la Tabla 23 y en la Tabla 24, con este proceso de modularización se incrementó la producción de licuadoras en un 8,7% y de procesadores de alimentos en un 24,22%.

Tabla 23. Análisis de eficiencia después de modularizar la licuadora.

Aumento en la eficiencia de diseño	2,79%
Aumento en la eficiencia de ensamble	3,80%
Porcentaje de reducción en el tiempo de ensamble	8,70%

Tabla 24. Análisis de eficiencia después de modularizar el procesadores de alimentos.

Aumento en la eficiencia de diseño	2,36%
Aumento en la eficiencia de ensamble	2,75%
Porcentaje de reducción en el tiempo de ensamble	24,22%

Para recapitular, al aplicar la metodología propuesta a la licuadora se obtuvo un aumento en la modularidad del 39.13%, una disminución en los tiempos de ensamble por licuadora del

8,70%, un aumento en la eficiencia de diseño y en la eficiencia de ensamble del 2,79% y 3,80% respectivamente. Además, con la nueva distribución de planta, de acuerdo a los módulos obtenidos, se aumentó la producción de licuadoras en un 116,67%, y por último llevando la utilización de los módulos a un trabajo de maximización con cuatro operarios, se aumentó en un 262% la producción total de licuadoras por día. Por su parte, al aplicar la metodología al procesador de alimentos, se obtuvo un aumento en la modularidad de 59,46%, una disminución en los tiempos de ensamble por procesador de alimentos del 24,22%, un aumento en la eficiencia de diseño y en la eficiencia de ensamble de 2,36% y 2,75% respectivamente. Con la nueva distribución de planta, de acuerdo a los módulos obtenidos, se aumentó la producción de procesadores de alimentos en un 98,08%, y por último, llevando la utilización de los módulos a un trabajo de maximización con cuatro operarios se aumentó en un 157,69% la producción total de procesadores de alimentos por día.

Los resultados de esta etapa, aplicados a los dos productos, evidencian que la implementación de esta metodología en los productos de una empresa incrementa significativamente la rentabilidad, principalmente en el aumento de la cantidad productos producidos, en nuestro caso de licuadoras o procesadores de alimentos. Además, estos cambios realizados desde una perspectiva modular, influyen también en la organización de la planta de producción, como se evidenciará más adelante.

En conclusión, tenemos para ambos productos que la eficiencia de diseño, al igual que la eficiencia de ensamble aumentó, el número de piezas en ambos productos disminuyó debido a la eliminación de piezas, el análisis funcional no se modificó, así que es el mismo antes y después de modularizar, y el diagrama de operaciones quedó notablemente más organizado.

De esta etapa obtenemos entonces, 4 salidas que salen de la fase, ya que se necesitan en otras, y 3 salidas que se quedan dentro de la fase como información interna. Las salidas de la fase son el producto modularizado, la lista de piezas 2, el diagrama de operaciones 2 y la matriz de interacción 2.

3.2 Segunda fase para la generación de familia de productos: De los módulos rediseñados a la plataforma de productos.

Luego de modularizar de manera individual la licuadora y el procesador de alimentos se obtuvieron dos procedimientos resultantes de esta modularización que fueron fundamentales para la conformación de la familia de productos y la planta de distribución que se propone en este trabajo. En primer lugar, el desensamble permitió entender el funcionamiento del producto y hacer el primer agrupamiento de las piezas en módulos para dar comienzo al proceso de modularización (Figura 37 y Figura 38). Dicho proceso dio lugar a cinco módulos en la licuadora y cinco módulos en el procesador de alimentos sobre los cuales se trabajará en esta segunda fase. En segundo lugar, las matrices de interacción de ambos productos permitieron estudiar cada una de las interacciones que hay entre las piezas de cada producto, y con este estudio se logró que cada uno de los módulos tuviera el mínimo número de interacciones entre sí (Figura 39 y Figura 40). Para esta nueva fase se

supondrá que los dos productos modularizados pertenecen a la misma planta manufacturera y se procede a evaluar la factibilidad de generar una familia de productos. Se parte de los módulos rediseñados después de la modularización, del número de piezas por módulo evidenciado a partir del desensamble y del número de interacciones entre módulos que arrojaron las matrices de interacción realizadas. Para identificar cada módulo hay que recordar que los módulos ya tendrán súper índice y sub índice, como se explicó anteriormente. A la licuadora se le asignó el número uno y a el procesador de alimentos se le asignó el número dos, quiere decir que M3 de la licuadora queda ahora denotado como M_3^1 y M5 del procesador de alimentos queda denotado como M_5^2 . Hay que recordar también que para denotar cantidades que dieran información de los dos productos simultáneamente se utilizaron dos superíndices y dos subíndices, el primer subíndice corresponde al módulo del producto que indica el primer superíndice, como en las ecuaciones (4) y (5).

3.2.1 Etapa de medición para obtener el nivel de similitud entre módulos

En esta primera etapa se medirán todas las características de los módulos que ya fueron rediseñados, por eso la entrada más importante a esta etapa, que a la vez es entrada de la fase, son los MR. Es importante aclarar que aunque en esta etapa se consideran solo 7 propiedades para medirle a los módulos, entre más cantidad se midan es mejor, ya que se obtendrá más información de cada uno de los MR. Las otras entradas de esta etapa son los tiempos de ensamble la matriz de interacción y el número de piezas, y la salida es la medida de todas las propiedades de los módulos rediseñados (Figura 54).

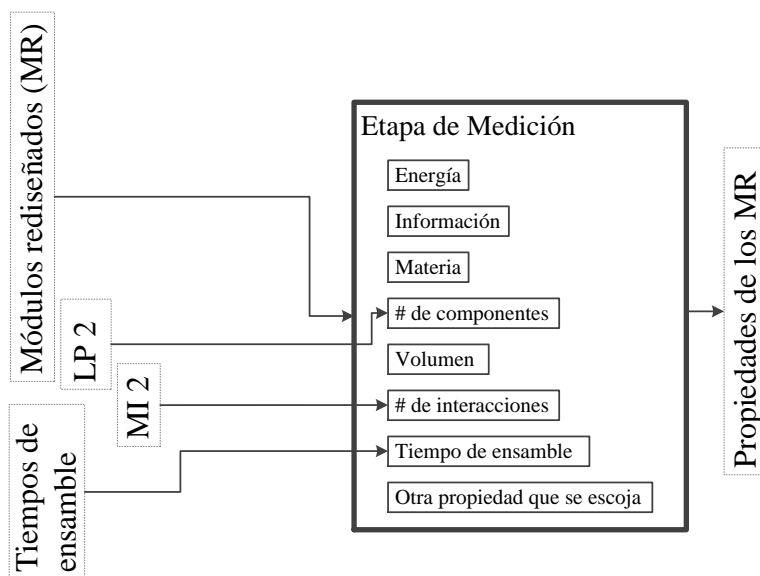


Figura 54. Etapa de medición (Fase 2). Elaboración propia

Para poder examinar el nivel de similitud entre los módulos, se midió la distancia de similitud entre cada uno de los módulos de la licuadora con los módulos del procesador de alimentos, es decir, se determinó la commonality entre ambos productos. Esto se realizó utilizando como propiedades la energía, la información y la materia que entra y que sale de los diferentes módulos. Adicional a esto, a cada módulo se le midió el peso, el volumen, el número de componentes, el número de interacciones con los otros módulos y el tiempo de

ensamble de cada módulo. Es preciso recordar que en los tres últimos casos la información se obtuvo del proceso de modularización, y además que estas medidas son adicionales a las que propone Hölttä, para considerar un mayor número de variables y lograr más exactitud en la distancia entre módulos.

Energía

Para medir la energía total que entra y sale a cada módulo se tuvieron en cuenta dos tipos de energía diferentes. La energía eléctrica que hace funcionar estos dos electrodomésticos y se transforma en energía cinética rotacional, y el trabajo realizado por la fuerza necesaria que debe aplicarse para accionar los productos.

Energía eléctrica

La energía eléctrica de entrada se halló midiendo primero la diferencia de potencial del suministro (enchufe) y la corriente que pasa por los cables de los electrodomésticos cuando la perilla está en la posición de más consumo de energía y el motor está actuando solo en aire. Luego, se calculó la potencia eléctrica “que representa la rapidez a la cual se le entrega energía al resistor”, con la conocida relación entre la corriente I y la caída de potencia ΔV (ecuación (6)) (Serway & Jewett, 2009, pág. 764).

$$P = I\Delta V \quad (6)$$

Tabla 25. Potencia eléctrica del motor de la licuadora

V (voltios)	I (amperios)	P (Nm/s)
112	1,17	131,04

Tabla 26. Potencia eléctrica del motor del Procesador de alimentos

V (voltios)	I (amperios)	P (Nm/s)
112	1,67	187,04

Para saber cuánta energía eléctrica consume el motor, calculamos la potencia mecánica, multiplicando la eficiencia por la potencia eléctrica. La eficiencia para estos motores es aproximadamente del 85% (ecuación (7))²⁰.

$$P_{mec} = P\eta \quad (7)$$

Donde η es la eficiencia mecánica, que en este caso es de 0,85. Se obtuvo para la licuadora 111,384 Joules/segundo de energía, que es la energía aprovechada por el motor para generar movimiento rotacional, y para el procesador de alimentos 158,984 Joules/segundo. Esta energía eléctrica es transformada en energía rotacional por el motor y se va transfiriendo a los diferentes módulos hasta llegar a las cuchillas en ambos productos. (Tabla 6 y Tabla 30).

²⁰ Cantidad medida por el laboratorio de mecatrónica de la universidad EAFIT, Medellín Colombia.

Trabajo realizado para accionar los productos

Para hallar el trabajo que se necesita para accionar estos electrodomésticos, se aplicó la definición de trabajo para una trayectoria circular a un modelo sencillo, en donde se supuso que la perilla es un disco circular que se pone a rotar con una fuerza constante, fuerza que se ejerce para superar la resistencia que hace la tarjeta de velocidades (ecuación (8)) (Serway & Jewett, 2008, pág. 170).

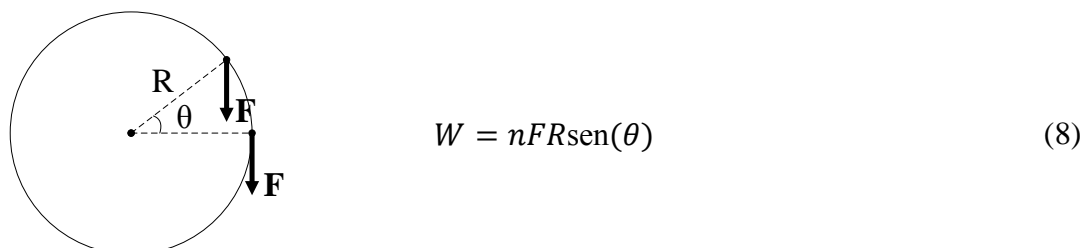


Figura 55. Modelo escogido para calcular el trabajo realizado en la rotación de la perilla de velocidades de ambos productos.

Todas las mediciones de energías se hicieron con la máxima velocidad de los electrodomésticos, por lo tanto n es igual al número de velocidades que tiene cada perilla. Finalmente, se obtuvo que la energía que entra a la licuadora por fuerza externa realizada es de 0,086 Joule, y la del procesador de alimentos es de 0,095 Joule.

Tabla 27. Energía necesaria para accionar la licuadora

$R(\text{m})$	$F(\text{N})$	$\theta (\text{Rad})$	n	$W (\text{joule})$
0,022	1,171	0,436	8	0,086

Tabla 28. Energía necesaria para accionar el procesador de alimentos

$R(\text{m})$	$F(\text{N})$	$\theta (\text{Rad})$	n	$W (\text{joule})$
0,022	5,041	0,436	2	0,095

El trabajo realizado para accionar ambos productos, que en este caso se le hace directamente a la perilla de velocidades, se transfiere al módulo que contiene la tarjeta de velocidades para regular el paso de corriente eléctrica (Tabla 29 y Tabla 30).

Información

En el caso de los dos electrodomésticos analizados, la información que más abunda en cada uno de los módulos de los productos son los símbolos, caracteres, flechas, líneas de división, imágenes y todo lo que está impreso en las superficies de los módulos para informar al usuario sobre como operar los electrodomésticos de la mejor manera. Por ejemplo, los números de la base que informan el posicionamiento de la perilla de velocidades para fijar la velocidad de las cuchillas.

Para medir la información suministrada por ambos productos, se contaron estos símbolos y caracteres presentes en el área de cada módulo y se tomaron como información de salida de los módulos. Esta información que cada módulo brinda es principalmente para que su funcionamiento sea óptimo o porque la ley exige que se haga determinada especificación. En la licuadora el módulo que más información suministra es M_4^1 , las especificaciones del motor contienen 38 caracteres que proveen información de las características para el buen

funcionamiento de este. La información suministrada por el módulo M^1_1 (29 símbolos), marca el nivel de materia que puede ser ingresada en la jarra, M^1_2 tiene 14 símbolos correspondientes a los números de las velocidades y a los caracteres e imágenes de la marca, M^1_5 tiene 1 símbolo que corresponde a la línea que señala la velocidad y M^1_3 no tiene ninguno. Por otra parte, para el procesador de alimentos el módulo que contiene más caracteres es M^2_1 , al igual que en la jarra, con 765 caracteres. Esta alta cantidad de información se debe que este módulo, en comparación con la jarra de la licuadora, tiene más funciones y por lo tanto requiere más información para su adecuado funcionamiento. Además, M^2_4 contiene las especificaciones del sistema eléctrico (377 símbolos), M^2_5 tiene 3 símbolos, los cuales corresponde a los números de las velocidades, que en este caso no están en la base si no en la perilla, y M^2_2 y M^2_3 no tienen ningún símbolo (Tabla 29 y Tabla 30).

Materia

Para los dos electrodomésticos que se analizaron en esta investigación, la cantidad de materia que ingresa a cada uno de los módulos es de diferente composición. Por lo tanto las mediciones se realizaron en cm^3 , unificando así toda la materia que interactúa con cada uno de los módulos y poderla comparar. Para las jarras de ambos productos, la materia que ingresa y que sale son líquidos o sólidos menos densos que las cuchillas y que las jarras de cada uno de los productos, el volumen total para la jarra de la licuadora es de 1500 cm^3 y para el procesador de alimentos es de $1742,34 \text{ cm}^3$. En los módulos M^1_2 y M^2_4 que corresponden a la base de cada uno de los productos, la materia que entra y que sale en ambos es aire para refrigerar el motor, el cual se midió como el volumen de espacio disponible dentro del módulo en donde puede circular el aire. Según nuestras mediciones, puede ingresar un volumen total de materia de $4168,9 \text{ cm}^3$ a M^1_2 y $6809,9 \text{ cm}^3$ a M^2_4 . Por último, los módulos M^1_3 , M^1_4 , M^1_5 , M^2_2 , M^2_3 y M^2_5 correspondiente a ambos productos no presentan entrada ni salida de materia (Tabla 29 y Tabla 30).

Número de componentes del módulo

Otra variable importante a la hora de definir si un módulo se asemeja a otro es la cantidad de componentes internos del módulo. Aunque casi siempre hay piezas que se pueden reemplazar, integrar o eliminar, si dos módulos van a ser iguales deben tener un número de piezas iguales. En estas medidas los módulos que más se asemejan entre sí son M^1_5 y M^2_5 , ambos con 1 componente, y M^1_1 y M^2_1 , que tienen 12 y 14 componentes respectivamente. El resto de las parejas de módulos correspondientes a la licuadora y al procesador de alimentos se diferencian mucho más que los anteriores en cuanto al número de componentes, así M^1_2 tiene 6 y M^2_2 tiene 16, M^1_3 tiene 3 y M^2_3 tiene 7 y M^1_4 tiene 14 y M^2_4 tiene 24 componentes respectivamente (Tabla 29 y Tabla 30).

Volumen del módulo

Para medir la cantidad de espacio que cada módulo ocupa, se midió solo la envolvente de los módulos de dos maneras, con una envolvente cilíndrica o con una envolvente paralelepípeda de ángulos rectos. Si el módulo contaba con una simetría cilíndrica, su envolvente se midió con la misma simetría y si tenía otra simetría se consideró la envolvente paralelepípeda. En el caso de la licuadora M^1_5 y M^1_3 cuentan con simetría cilíndrica, mientras que M^1_2 y M^1_4 cuenta con otro tipo de simetría por lo que se ajustó a una geometría paralelepípeda. Para las jarras para ambos productos, los correspondientes

módulos M^1_1 y M^2_1 , tienen en general una simetría cilíndrica, pero las agarraderas dañan esta simetría, así que se les midió el volumen con una envolvente paralelepípeda. Para el procesador de alimentos, el módulo M^2_5 cuenta con simetría cilíndrica y a M^2_2 , M^2_3 y M^2_4 se les consideró una envolvente paralelepípeda (Tabla 29 y en la Tabla 30).

Número de interacciones del módulo con otros módulos

Como ambos productos están previamente modularizados, se tuvieron en cuenta las interacciones definidas previamente mediante el conteo de los cuadros negros que están por fuera de los módulos en las matrices de interacción. Las interacciones de cada módulo con el resto de los módulos de su respectivo producto se pueden resumir como sigue, para la licuadora se determinó que M^1_1 interactúa 3 veces, M^1_2 interactúa 8 veces, M^1_3 interactúa 4 veces, M^1_4 interactúa 9 veces y M^1_5 interactúa 2 (Figura 41 y Tabla 29). Y para el procesador de alimentos se obtuvo que M^2_1 interactúa 4 veces, M^2_2 interactúa 7 veces, M^2_3 interactúa 5 veces, M^2_4 interactúa 12 veces y M^2_5 interactúa 2 veces (Figura 42 y Tabla 30).

Tiempos de ensamble por módulo

El tiempo de ensamble de cada módulo es fundamental para hacer un análisis certero de la distribución de planta, ya que el tiempo del módulo más lento limita el ensamble del producto completo. Luego de hacer estas mediciones se determinó que para la licuadora M^1_1 tiene un tiempo de ensamble de 48,07 s, M^1_2 de 28,97 s, M^1_3 de 20,72 s, M^1_4 de 364,60 s y M^1_5 de 2 s, y para el procesador de alimentos M^2_1 tiene un tiempo de ensamble de 82,65 s, M^2_2 106,41, M^2_3 170,81 s M^2_4 483, 67 y M^2_5 2 s (Tabla 29 y Tabla 30).

Peso

La última variable que se consideró, con el fin de coleccionar la mayor cantidad de información posible de cada uno de los módulos, fue el peso. Cada módulo de la licuadora y del procesador de alimentos fue pesado independientemente en una báscula Mettler Toledo ME4002 y los resultados se presentan en la Tabla 29 y en la Tabla 30 respectivamente.

Tabla 29. Propiedades de los módulos rediseñados de la licuadora

Licuadora	Medidas (m)	M^1_1	M^1_2	M^1_3	M^1_4	M^1_5	Dimensiones
Flujos de Entrada	Energía (IE)	111,38	0,00	111,38	131,04	0,00	Joules en un s
	Trabajo (IW)	0,00	0,00	0,00	0,09	0,09	Joules
	Símbolos (IS)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Símbolos
	Materia (IM)	1500,00	4168,88	0,00	0,00	0,00	cm ³
Flujos de salidas	Energía (OE)	111,38	0,00	111,38	111,38	0,00	Joules en un s
	Trabajo (OW)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,09	Joules
	Símbolos (OS)	29,00	14,00	0,00	38,00	1,00	# Símbolos
	Materia (OM)	1500,00	4168,88	0,00	0,00	0,00	cm ³
Propiedad es del módulo	# de comp. (#C)	12,00	6,00	3,00	14,00	1,00	# de comp.
	Peso (P)	431,07	382,11	17,31	889,25	5,29	g
	Volumen (V)	5390,00	5117,86	41,49	1470,00	30,77	cm ³
	# de inter. (#I)	3,00	8,00	4,00	9,00	2,00	# de inter.
	T. de Ensamble (t)	48,07	28,97	20,72	364,60	2,00	Segundos

Tabla 30. Propiedades de los módulos rediseñados del procesador de alimentos

Procesador de alimentos	Medidas (m)	M21	M22	M23	M24	M25	Dimensiones
Flujos de Entradas	Energía (IE)	158,98	158,98	158,98	187,04	0,00	watts
	Trabajo (IW)	0,00	0,00	0,00	0,10	0,10	Joule
	Símbolos (IS)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	Símbolos
	Materia (IM)	1742,34	0,00	0,00	6809,90	0,00	cm3
Flujos de Salidas	Energía (OE)	158,98	158,98	158,98	158,98	0,00	watts
	Trabajo (OW)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	Joule
	Símbolos (OS)	765,00	0,00	0,00	377,00	3,00	# Símbolos
	Materia (OM)	1742,34	0,00	0,00	6809,90	0,00	cm3
Propiedades del módulo	# de comp. (#C)	14,00	16,00	7,00	24,00	1,00	# de comp.
	Peso (P)	776,15	158,42	47,76	1086,61	5,90	g
	Volumen (V)	10879,96	1568,21	186,12	8563,67	34,90	cm3
	# de inter. (#I)	4,00	7,00	5,00	12,00	2,00	# de inter.
	T. de Ensamble (t)	82,65	106,41	170,81	483,67	2,00	Segundos

Esta etapa lo que busca es lograr una comparación precisa de los módulos pero es una comparación que oculta la forma real que tiene el módulo, por esto es que se proponen variables cuantitativas y no cualitativas, para que estas medidas sean medidas más objetivas de cada uno de los módulos. La salida de esta etapa son las últimas dos tablas en donde esta consignada toda la información por módulos (Tabla 29 y Tabla 30).

3.2.2 Etapa de comparación entre módulos: elección de módulos similares.

Con esta etapa se pretende comparar y coleccionar la información necesaria de los módulos rediseñados para que quede a disposición para el análisis en la siguiente etapa, para esto se consideró una comparación cuantitativa. La idea es hacer un primer filtro con la comparación cuantitativa, ya que se hacen las mismas operaciones para todos los módulos y luego con los módulos más cercanos se evalúa de manera cualitativa, a través de la forma y la función principal de cada módulo. Para esta etapa son necesarias las propiedades de los MR, la función principal de los MR y el diagrama de operaciones.

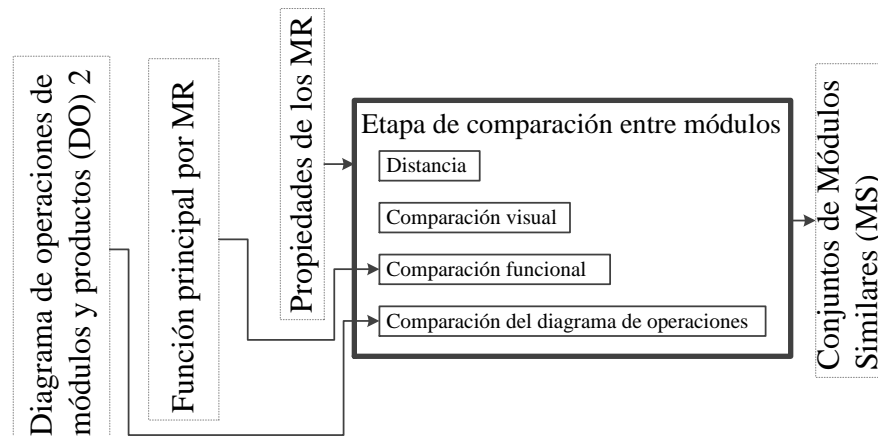


Figura 56. Etapa de comparación entre módulos. Fase 2. Elaboración propia

3.2.2.1 Distancia de similitud entre los módulos

Para encontrar la similitud entre los módulos de ambos productos se debe recordar que se definió la distancia entre ellos con las ecuaciones (4) y (5). La distancia entre medidas (d), que puede definirse como la magnitud que compara las diferentes medidas (m), evidencia si una propiedad determinada es semejante a otra, siempre y cuando ambas propiedades sean diferentes de cero. Cuando dos medidas comparables son iguales a cero no se obtiene información alguna debido a que los módulos analizados no cuentan con estas propiedades. En promedio, en cada cálculo de la distancia entre módulos (D) hay 3 ceros en la distancia entre medidas (d). Esto se debe a que algunos módulos no cuentan con algunas propiedades, por lo que la distancia d también es igual a cero. Este fue el caso de la distancia entre M^1_1 y M^2_1 (D^{12}_{11}) con las medidas del trabajo de entrada (WI^{12}_{11}), la energía de entrada (IS^{12}_{11}) y el trabajo de salida (OW^{12}_{11}) (Tabla 7). Esta misma situación se presentó en todas las otras distancias entre módulos. Vale la pena resaltar, que en la distancia D^{12}_{55} , además de ceros como los descritos anteriormente, presentó dos ceros que sí corresponden a la igualdad entre dos medidas, el número de componentes y el tiempo de ensamble para M^1_5 y M^2_5 , lo que contribuyó a que la distancia entre estos módulos fuera la más corta.

La presencia de medidas iguales a cero evidenció que algunas distancias entre módulos (D) que no son parecidos, fuera muy pequeña, como el caso de M^1_4 y M^2_2 , lo que no reflejaba exactamente la similitud entre módulos. Para corregir este error, se decidió adicionar las últimas propiedades ya mencionadas: el número de componentes de cada módulo ($\#C$), el peso (P), el volumen (V), el número de interacciones entre módulos ($\#I$) y el tiempo de ensamble de cada uno de los módulos (T), las cuales permitieron calcular distancias entre los módulos más precisas y ajustadas a la realidad (Anexo 2. Distancias entre módulos con sus respectivas distancias entre medidas para la licuadora y el procesador de alimentos.).

Tabla 31. Distancia de similitud entre M^1_1 y M^2_1
Las demás distancias de similitud se pueden ver en el Anexo 2

Distancia entre medidas m del módulo uno de ambos productos	IE^{12}_{11}	-0,30
	IW^{12}_{11}	0,00
	IS^{12}_{11}	0,00
	IM^{12}_{11}	-0,14
	OE^{12}_{11}	-0,30
	OW^{12}_{11}	0,00
	OS^{12}_{11}	-0,96
	OM^{12}_{11}	-0,14
	$\#C^{12}_{11}$	-0,14
	P^{12}_{11}	-0,44
	V^{12}_{11}	-0,50
	$\#I^{12}_{11}$	-0,25
	T^{12}_{11}	-0,42
Distancia entre los módulos M^1_1 y de M^2_1	D^{12}_{11}	1,36

D^i_j	M^2_1	M^2_2	M^2_3	M^2_4	M^2_5
M^1_1	1,36	2,18	2,40	2,33	3,26
M^1_2	2,28	2,60	2,75	2,52	2,95
M^1_3	2,51	1,85	1,53	2,89	2,64
M^1_4	2,39	1,83	2,12	2,00	2,87
M^1_5	3,32	3,04	2,93	3,25	0,70

Figura 57. Matriz de distancias entre los diferentes módulos rediseñados
El súper índice representa el producto y subíndice el módulo

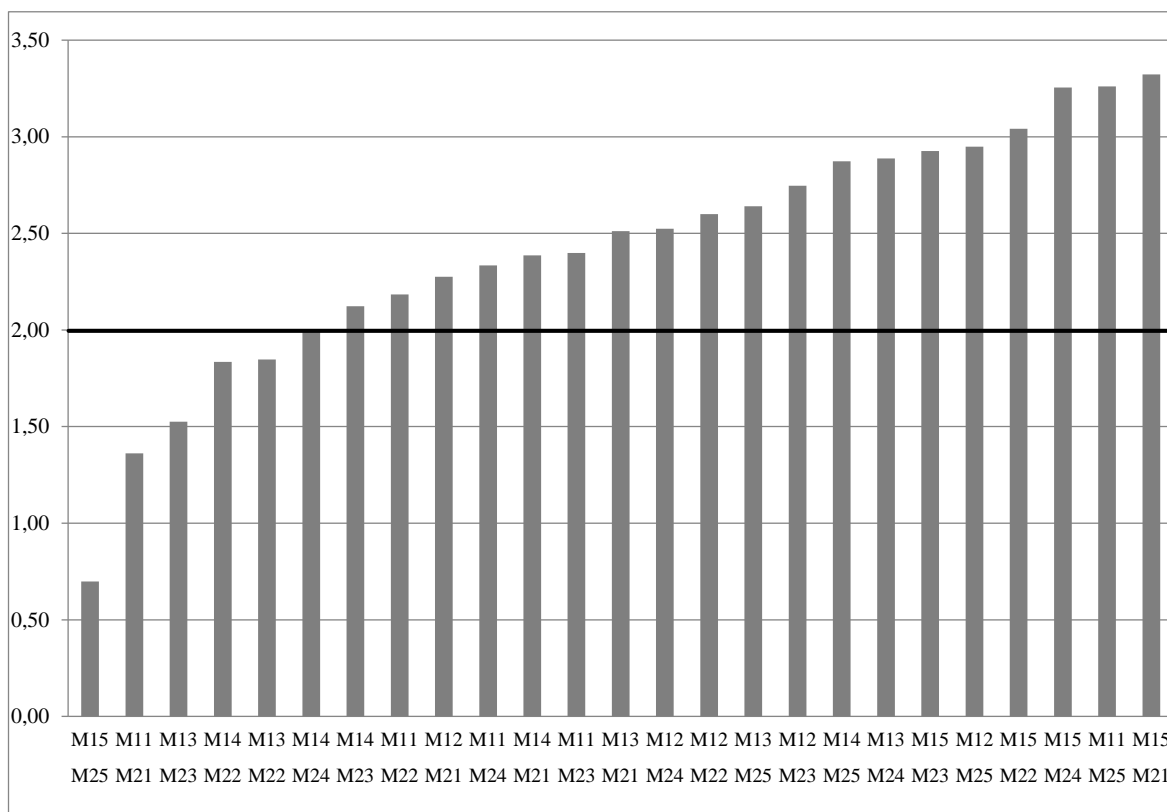


Figura 58. Esquema de barras de distancias entre módulos

Los módulos que tienen una distancia por debajo de la línea horizontal mostrada en la figura fueron los elegidos para evaluar su similitud. En esta grafica M^i_j equivale a Mij

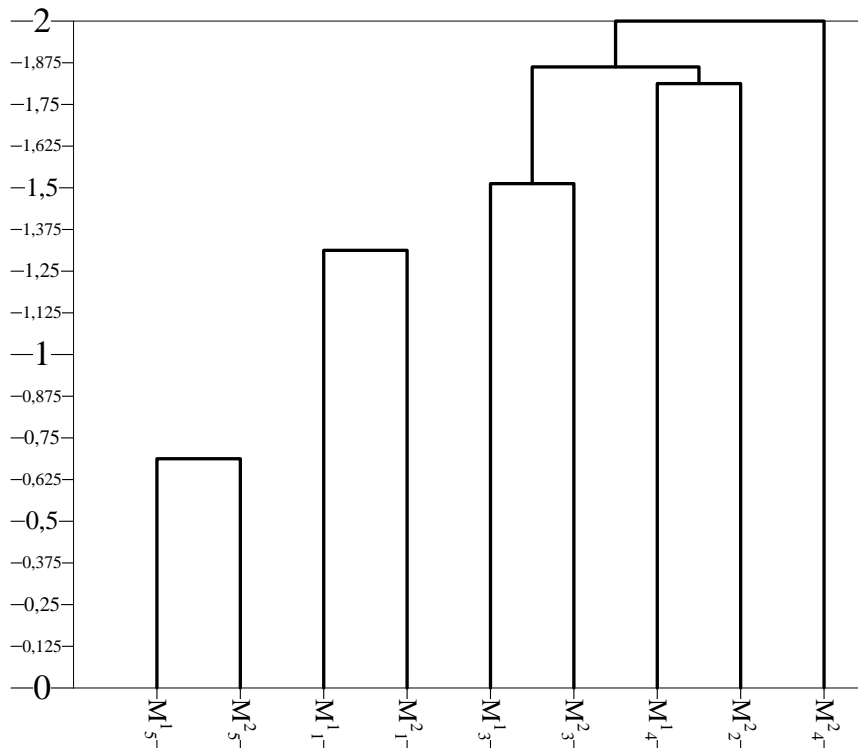


Figura 59. Dendrograma para los módulos elegidos para evaluar su similitud

3.2.2.2 Comparación de la forma y la función principal de los módulos para escoger los módulos que conformaran la plataforma de productos

Como último paso, se comparó la forma, el peso, el volumen y la función de cada una de las parejas de módulos escogidas. Como se dijo anteriormente, al comparar las propiedades anteriores se notó que la distancia entre los módulos no es una medida del todo acertada para saber la similitud entre módulos, ya que para la metodología seleccionada la ausencia de ciertas propiedades en los módulos hace que módulos que no se parecen, tengan una distancia pequeña entre ellos. En esta etapa, lo único que se debe hacer es consignar la información como en las tablas mencionadas en el capítulo 2.2 para seguir con la metodología y el análisis que se hace en la siguiente etapa.

Tabla 32. Comparación de forma, peso, volumen y función principal de M^1_5 y M^2_5 . Fotos propias



Licuadora M^1_5		Procesador de alimentos M^2_5	
			
P(g)	5,290	P(g)	5,900
V (m ³)	30,770	V (m ³)	34,900
Función	Amplificar fuerza humana	Función	Amplificar fuerza humana

Tabla 33. Comparación de forma, peso, volumen y función principal de M^1_1 y M^2_1 . Fotos propias

Licuadora M^1_1		Procesador de alimentos M^2_1	
			
P(g)	431,07	P(g)	776,15
V (m ³)	5390,00	V (m ³)	10879,96
Función	Contener Materia	Función	Contener Materia y dosificar materia para ser rebanada

Tabla 34. Comparación de forma, peso, volumen y función principal de M^1_3 y M^2_3 . Fotos propias


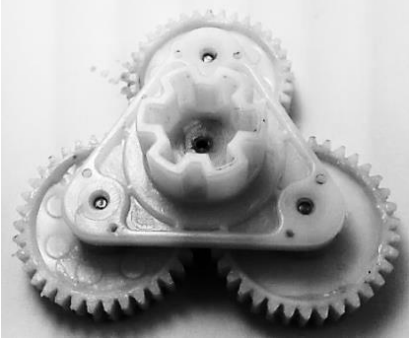
Licuadora M^1_3		Procesador de alimentos M^2_3	
			
P(g)	17,310	P(g)	47,760
V (m ³)	41,486	V (m ³)	186,124
Función	Transferir velocidad angular	Función	Amplificar Torque y disminuir la velocidad angular

Tabla 35. Comparación de forma, peso, volumen y función principal de M^1_4 y M^2_2 . Fotos propias

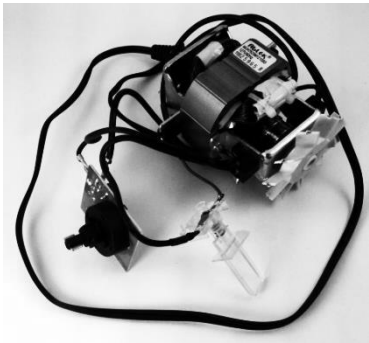


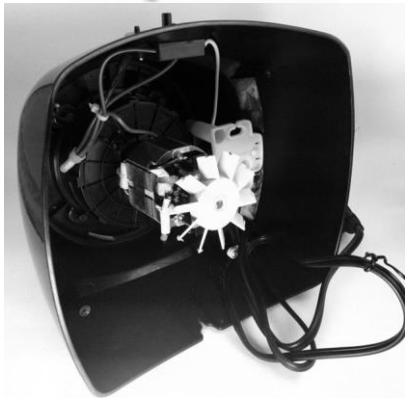
Licuadora M^1_4		Procesador de alimentos M^2_2	
			
P(g)	889,250	P(g)	158,420
V (m ³)	1470,000	V (m ³)	1568,205
Función	Convertir energía eléctrica en energía cinética rotacional	Función	Transferir velocidad angular

Tabla 36. Comparación de forma, peso, volumen y función principal de M^1_3 y M^2_2 . Fotos propias

Licuadora M^1_3		Procesador de alimentos M^2_2	
			
P(g)	17,310	P(g)	158,420
V (m3)	41,486	V (m3)	1568,205
Función	Transferir velocidad angular	Función	Transferir velocidad angular

Tabla 37. Comparación de forma, peso, volumen y función principal de M^1_4 y M^2_4 . Fotos propias

Licuadora M^1_4		Procesador de alimentos M^2_4	
		 	
P(g)	889,250	P(g)	1086,610
V (m ³)	1470,000	V (m ³)	8563,665
Función	Convertir energía eléctrica en energía cinética rotacional	Función	Convertir energía eléctrica en energía cinética rotacional

Para esta etapa hay que tener como referencia los diagramas de operaciones de los productos involucrados, para poder tomar decisiones y pasar a la etapa creativa que es donde se generaran los módulos comunes. Además, se observa claramente la importancia del análisis cualitativo que se le debe hacer a los módulos, ya que la distancia cuantitativa puede tener errores por los ceros mencionados anteriormente. De esta etapa resulta entonces, un conjunto de módulos similares que se deben hacer comunes a los productos para formar la familia de productos que se busca.

3.2.3 Etapa creativa: generación de la plataforma de productos, al elegir los módulos comunes.

Esta etapa, la última de la fase 2, es muy importante porque es donde se toman las decisiones de cuales módulos son los que se van a hacer comunes a los productos modularizados. La única entrada que tenemos es el conjunto de módulos similares.

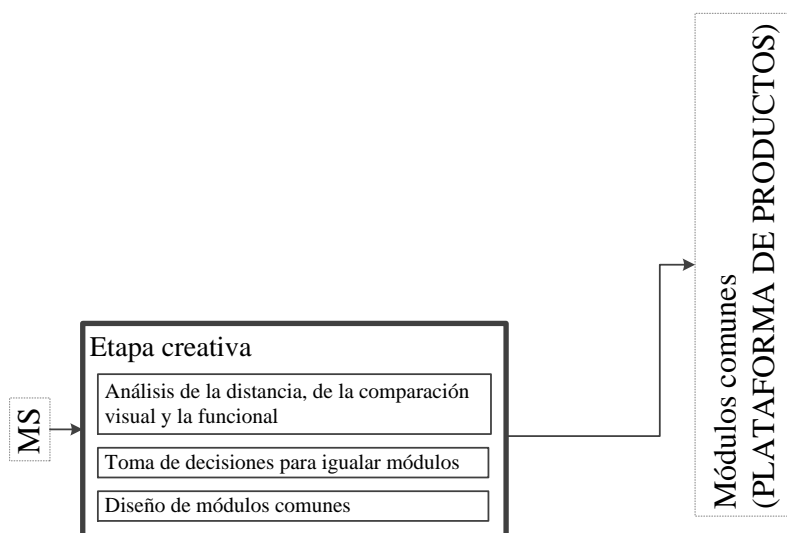


Figura 60. Etapa creativa (Fase 2). Elaboración propia

3.2.3.1 Análisis de la distancia, de la comparación visual y la función

A partir de los resultados obtenidos en la etapa anterior, se evaluó cuales módulos iban a definir la familia de productos que se desea conformar. Las parejas de los módulos con una menor distancia entre sí fueron M^1_5 y M^2_5 , M^1_1 y M^2_1 , M^1_3 y M^2_3 , M^1_4 y M^2_2 , M^1_3 y M^2_2 y M^1_4 y M^2_4 . (Figura 57, Figura 58 y Figura 59). Con estas parejas de módulos se procedió a analizar su forma y función para definir módulos comunes y proponer una nueva distribución de planta más eficiente.

Los módulos que menor distancia mostraron con el análisis anterior fueron M^1_5 y M^2_5 . Estos módulos corresponden a la perilla de velocidades, la cual en ambos productos tiene una forma, un peso y un volumen muy similar. Adicionalmente, estos módulos presentan la misma función, en ambos la perilla de velocidades se encarga de amplificar la fuerza humana, por lo tanto fueron los primeros módulos que se escogieron para igualar (Tabla 32).

Los módulos M^1_1 y M^2_1 tienen una medida de la distancia entre ellos de 1,36, siendo la segunda pareja más parecida según la medida de distancia obtenida. Cuando se comparó el peso y el volumen no se observó similitud entre estas medidas. Además, se evidenció que ambos módulos presentan una diferencia significativa en su función principal y en su forma, por lo que se decidió que estos módulos no serían igualados para ser parte de la plataforma (Tabla 33).

La siguiente pareja de módulos que se compararon fueron M^2_3 y M^1_3 . Según nuestras observaciones, estos dos módulos presentan funciones diferentes. El módulo M^2_3 necesita movimiento relativo entre sus partes y su función es garantizar la disminución de la velocidad angular y el aumento del torque en el procesador de alimentos. En cambio el módulo M^1_3 lo único que hace es transferir la velocidad angular a las cuchillas de la licuadora. Por otro lado, al comparar el peso, el volumen y la forma se evidenció que estos módulos no tienen nada en común, por tanto no son aptos para igualarlos, aunque la distancia previamente medida fuese mínima (Tabla 34).

De manera similar, después de analizar las variables adicionales en la pareja M^1_4 y M^2_2 se encontró que son totalmente diferentes, por tanto no aptos para igualar. El funcionamiento de M^1_4 está gobernado por la energía eléctrica que entra por el cable de alimentación, para luego ser transformada en energía rotacional, que al final termina en las cuchillas de la licuadora. Mientras que a M^2_2 solo le entra energía rotacional, que se transfiere a las cuchillas. La diferencia de estos dos módulos también se hizo evidente cuando se compararon el peso, el volumen y la forma (Tabla 35).

En el caso de M^1_3 y M^2_2 se encontró que ambos módulos tienen la misma función principal, transferir la velocidad angular a las cuchillas. Sin embargo, el volumen, el peso y la forma son muy diferentes, además M^2_2 necesita movimiento relativo entre sus partes, ya que es el eje de rotación y la base permanece quieta mientras el eje rota. Por tanto, se decidió que esta pareja de módulos tampoco haría parte de la plataforma (Tabla 36).

Por último, se estudiaron M^1_4 y M^2_4 , estos dos módulos tienen una distancia muy corta entre ellos comparada con la distancia de todos los módulos en general pero tienen la distancia más grande de los escogidos para esta evaluación. Se observó que ambos módulos contienen el sistema eléctrico, por tanto la función de ambos es la misma, convertir energía eléctrica en energía cinética rotacional. La diferencia principal entre ellos radica en que M^2_4 contiene parte de la base mientras que M^1_4 no, pero las entradas y las salidas de energía eléctrica son muy parecidas. Asimismo, el número y el tipo de los componentes de ambos módulos son bastante semejantes entre sí (Tabla 37). Por lo anterior, se decidió hacer estos dos módulos iguales quitándole la base a M^2_4 y dejando solo los componentes del sistema eléctrico. Según este cambio el procesador de alimentos quedó con un nuevo módulo nombrado M^2_6 y conformado por los componentes que no hacen parte del sistema eléctrico (componentes del 38 al 45) (Tabla 37).

3.2.3.2 Toma de decisiones y diseño de módulos comunes

De acuerdo a lo analizado en la anterior operación, se obtuvieron dos módulos que son los que conformaran la familia de productos que proponemos en esta investigación, el módulo correspondiente al sistema eléctrico (M^1_4 y M^2_4) y el módulo perilla de velocidades (M^1_5 y M^2_5). El resto de módulos quedó sin alteración alguna y se creó otro módulo para el procesador de alimentos que corresponde a la base (M^2_6).

En este caso el proceso de diseño es muy sencillo porque se toma la decisión de hacer los módulos del procesador de alimentos iguales a los de la licuadora, por tanto no hay que intervenirlos. El trabajo que sí es importante es que las interfaces para el procesador de alimentos, que al no ser iguales a las interfaces de la licuadora se deben cambiar para la implementación de los módulos finales. En este caso se tomó la decisión de hacer un módulo igual a otro, pero en general se podría diseñar un nuevo módulo que se adapte a los productos, en este caso a la licuadora y al procesador de alimentos.

Esta última etapa es decisiva y muy importante para generar la familia de productos porque se debe decidir hasta qué punto se tomará en cuenta la comparación cuantitativa y a que módulos se les realizará la comparación cualitativa. Queda muy claro que un análisis cualitativo no es suficiente para decidir cuáles son los módulos que deben componer la familia de productos.

Esta segunda fase tiene como salidas los módulos que conforman la plataforma de productos y los módulos que no tienen similitud entre productos, o sea los módulos rediseñados que no se escogieron para el conjunto de módulos similares.

4. A modo de conclusiones

4.1 Tercera fase: redistribución de planta para una familia de productos.

Esta fase se presenta dentro de las conclusiones, ya que valida todo el trabajo de modularización y en ella se evidencia claramente los beneficios de modularizar cuando se lleva hasta la redistribución de planta. Como salida principal de esta fase se obtiene el rediseño final de planta para una familia de productos.

Modularizar y crear una familia de productos permitió que construir la distribución de planta fuera más sencillo, ya que contar con módulos bien definidos transforma las áreas de trabajo en unas más compactas y, así mismo más definidas, dando organización y eficiencia al proceso de ensamble. Por otro lado, cuando se cuenta con módulos que constituyen la plataforma se consolidan áreas comunes para ambos productos lo que incrementa la versatilidad de la empresa y su eficiencia.

Esta última fase consta de solo dos etapas para construir la distribución de planta. Es importante notar que estas dos etapas están fuertemente relacionadas y no tienen una secuencia lógica, ya que para hacer una buena distribución se deben calcular tiempos y

medir la eficiencia pero para medir la eficiencia, se debe tener una distribución de planta inicial o una primera propuesta.

4.1.1 Diseño de áreas de ensamble

En esta etapa se deben tomar los módulos de la plataforma y los módulos rediseñados para organizarlos en áreas de trabajo, empezando por los módulos de la plataforma y adicionando a la línea de ensamble formados por ellos el resto de módulos. Esta etapa puede tener múltiples cambios luego de pasar por la etapa número dos, ya que se genera un proceso de retroalimentación entre las etapas.

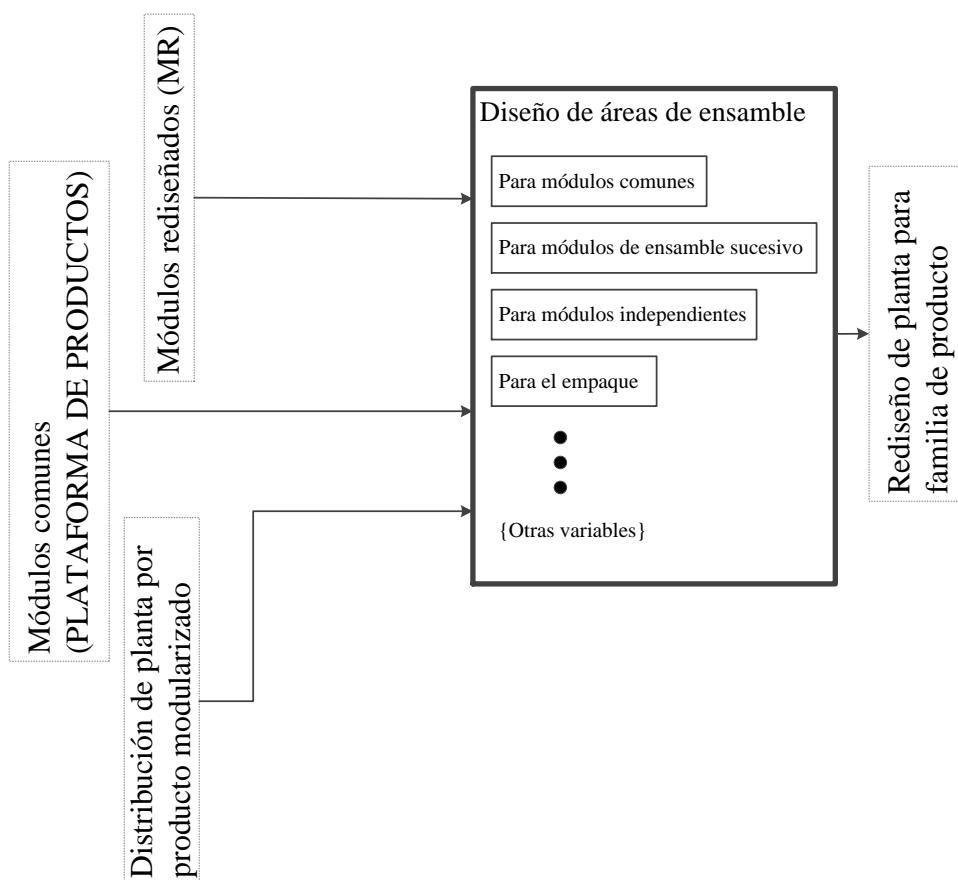


Figura 61. Diseño de áreas de ensamble (Fase 3). Elaboración propia

Lo primero que se hizo fue decidir cómo se iban a ensamblar cada uno de los módulos generando las áreas de trabajo. Se le asignó a M^1_4 y a M^2_4 una sola área, ya que como se explicó anteriormente, se decidió que estos módulos hacen parte de la plataforma y por tanto fueron igualados. A M^1_2 , M^1_3 y M^1_5 se les asignó la misma área de ensamble porque estos módulos son ensamblados sucesivamente. Igualmente, a M^2_3 , M^2_6 y M^2_5 . M^1_1 , M^2_1 y M^2_2 , los módulos que menos interacciones tienen con los otros, se les asignó, a cada uno, un área de trabajo independiente. Por último, se le asignó un área al proceso de empaque, procedimiento fundamental para poner el producto en el mercado. Para organizar estas áreas de ensamble también se tuvo en cuenta que cada módulo luego de ser ensamblado recorriera el mínimo desplazamiento, logrando así una empresa más eficiente y organizada.

4.1.2 Análisis comparativo de eficiencia por distribución de planta

En esta etapa se calcularon y compararon los tiempos de operarios, los productos totales que se realizan y como se puede jugar con estos valores para obtener la distribución de planta más eficiente. Estas mediciones influyen fuertemente en la etapa anterior, ya que si un cálculo de eficiencia no es el esperado se redistribuye la planta para optimizar el proceso de ensamble.

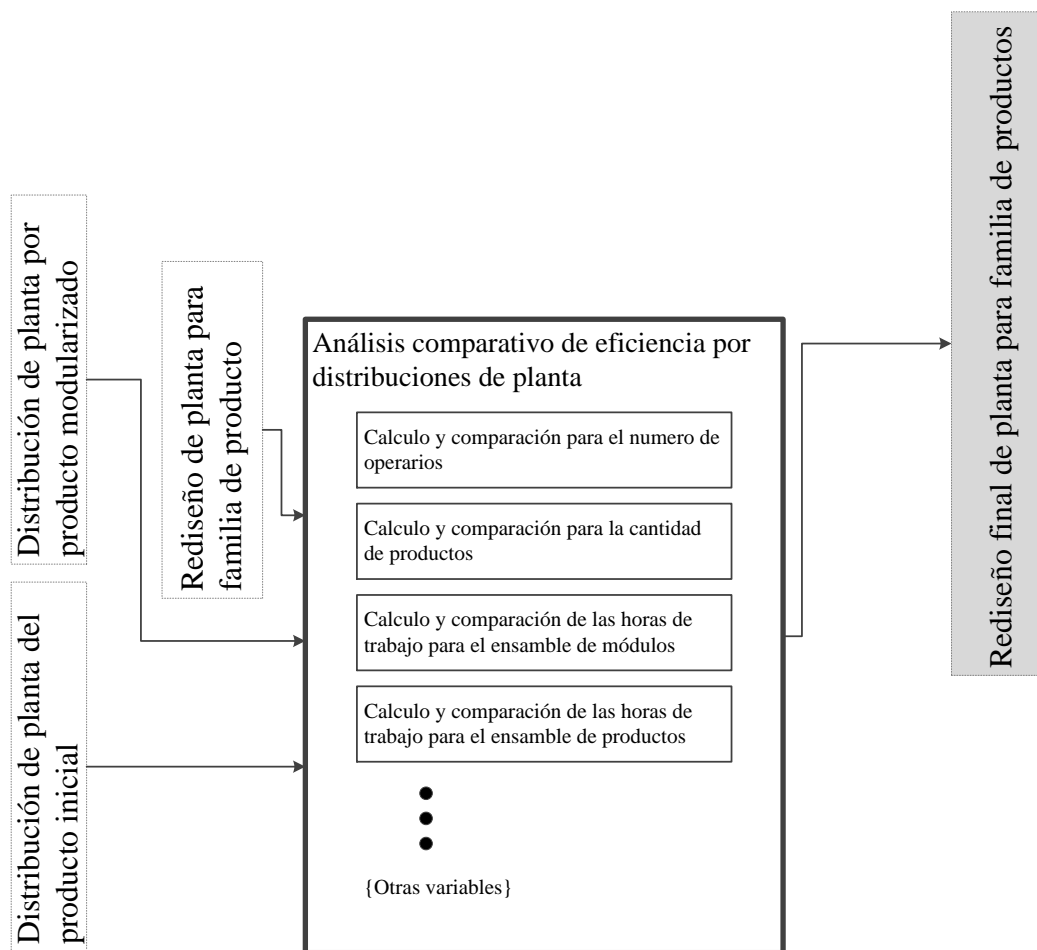


Figura 62. Análisis comparativo de eficiencia por distribuciones de planta (Fase 3). Elaboración propia

Para definir el número de operarios por área de trabajo se supuso que en un día se ensamblarían 400 licuadoras y 270 procesadores de alimentos. Dichos valores fijan inmediatamente el número de operarios, ya que se conoce el tiempo que se demora cada uno de los módulos en ser ensamblado, por tanto se conoce el número de módulos que puede ensamblar un solo operario en un día (Tabla 38, Tabla 39 y Tabla 40). Además, para buscar más versatilidad en la planta, se calculó el tiempo que cada área de trabajo se demora en ensamblar 400 módulos de un producto y 270 del otro. Con esta medición se puede determinar cómo y cuáles operarios pueden terminar de ensamblar su cuota y ayudar en otra área. Por ejemplo, el área M^1_1 se demora 5 horas 21 minutos en ensamblar los 400 módulos correspondientes a ese día, por tanto el operario que ensambla este módulo podría

trabajar en otra área o en un punto de chequeo hasta completar su jornada laboral, para así acelerar los procesos de ensamble y de producción.

Tabla 38. Eficiencia de la distribución de planta para la licuadora

400 licuadoras diarias				Horas de trabajo diarias por operario para cumplir la cuota	
Módulos	tiempo de ensamble	# de módulos diarios con 1 operario	Operarios en Área	horas	min
M^1_1	48,07	599	1	5	21
M^1_2	202,39	142	3	7	30
M^1_3					
M^1_4	214,60	134	3	7	57
M^1_5	2,00	14400	1	0	14

Tabla 39. . Eficiencia de la distribución de planta para el procesador de alimentos

270 procesadores diarios				Horas de trabajo diarias por operario para cumplir la cuota	
Módulos	tiempo de ensamble	# de módulos diarios con 1 operario	Operarios en Área	horas	min
M^2_1	82,65	348	1	6	12
M^2_2	66,41	433	1	4	59
M^2_3	481,88	59	5	7	14
M^2_6					
M^2_4	214,60	134	3	5	22
M^2_5	2,00	14400	1	0	9

Tabla 40. . Eficiencia de ensamble para los módulos M^1_4 y M^2_4

670 M^1_4 y M^2_4 diarios				Horas de trabajo diarias por operario para cumplir la cuota	
Módulos	tiempo de ensamble	# de módulos diarios con 1 operario	Operarios en Área	horas	min
M^1_4 y M^2_4	214,60	134	5	8	0

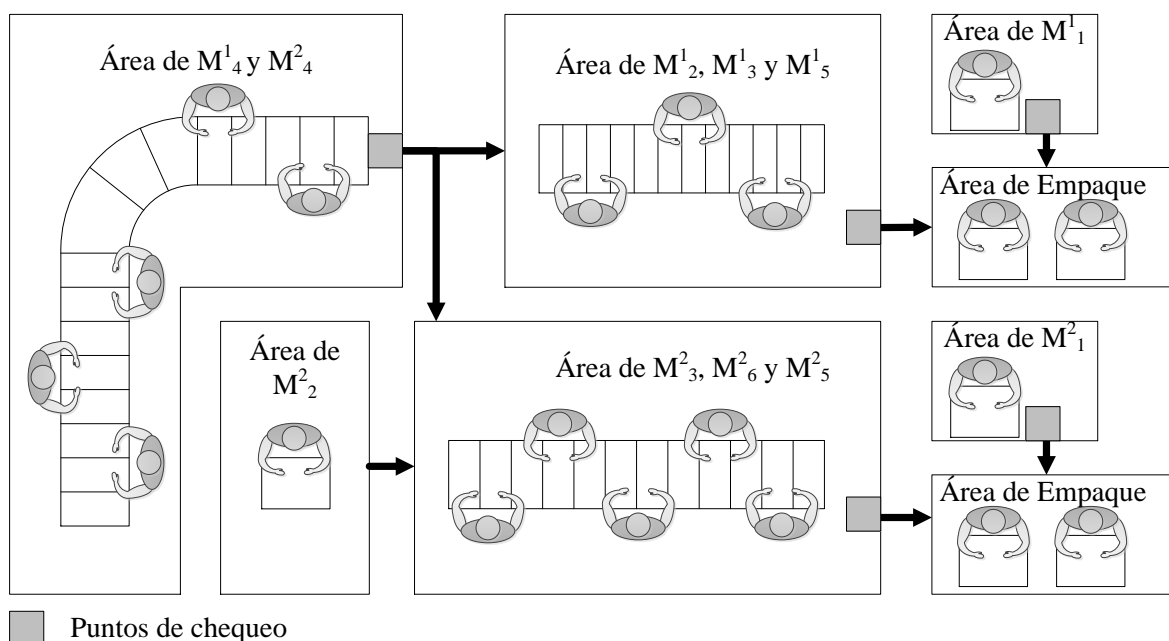


Figura 63. Distribución de planta para la familia de productos. Elaboración propia

Al generar la plataforma de productos se obtienen diferentes beneficios que redundan en mayor eficiencia de los procesos productivos. En nuestro caso se logró una planta en la que se puede producir el mismo número de productos con menos operarios y en menos tiempo. Por ejemplo, en el caso de los módulos M^1_4 y M^2_4 al ensamblarlos por separado cada uno de ellos necesitaba 3 operarios para conseguir la cuota diaria de 400 M^1_4 y 270 M^2_4 (Tabla 38 y Tabla 39), al volverlos un solo módulo y crear la plataforma solo se necesitan 5 operarios para terminar con la misma cuota en un día (Tabla 40), es decir, se logró reducir el número de operarios. Otro de los beneficios que se encontró al crear una familia de productos a partir de módulos, es que permite mantener la planta de producción activa así no hayan pedidos de un producto. Por ejemplo, si la empresa vendiese más licuadoras que procesadores de alimentos y contara con la distribución de planta propuesta, podría producir un solo producto de manera más eficiente, si en un momento determinado no fueran solicitados procesadores de alimentos, la única área de trabajo que se tendría que “apagar” sería la correspondiente M^2_2 y toda el área correspondiente a M^2_3 , M^2_6 y M^2_5 se convertiría en el área M^1_2 , M^1_3 y M^1_5 , volviendo más eficiente la producción de licuadoras.

4.2 Discusión

El primer aspecto que nos gustaría resaltar, a partir de esta investigación es la innovación en la aplicación y la interacción poco convencional de dos herramientas de diseño para X en el rediseño de productos. La aplicación de DFA (design for assembly) en función de MI (Matriz de Interacción), es una combinación de herramientas novedosa y con una aplicación metodológica potente para la modularización de los productos. Cuando se busca la creación de módulos, generalmente se implementan para el ensamble de los productos, ósea para obtener módulos para el ensamble. Por su parte, cuando se usa DFA en el producto completo se obtiene un producto más integral que modular, y cuando se usan metodologías de modularización, en muchos casos, se aumentan muchísimo el número de

partes de los productos. Con este trabajo se demostró que al combinar estas dos metodologías se pueden obtener productos modulares sin incrementar el número de piezas de los productos, logrando que no se aumenten los costos en la producción por producto, sino todo lo contrario, se obtienen productos modulares que reducen los costos de fabricación por producto. Es evidente también que con esta combinación de herramientas se puede prevenir la generación exagerada de módulos en el diseño modular de productos lo que conlleva a un aumento de los costos en el momento de la producción.

El segundo aspecto se refiere a la forma de medir la similitud entre dos módulos, específicamente a la distancia entre ellos como lo propone Hölttä en su tesis doctoral (Hölttä-Otto, 2005). En esta investigación se hace un ajuste a la forma de medir esta distancia ya que se propone la medición de más propiedades de los módulos que se pretenden comparar. La medida de la energía, la información y la materia no es suficiente para caracterizar un módulo, ni para medir la distancia entre dos módulos de un producto. Es ideal que dichas propiedades sean generales y se le puedan medir a todos los módulos que se compararan, como el número de piezas o el número de interacciones con los otros módulos. Además de este ajuste, siempre va a ser importante hacer un estudio cualitativo de los módulos, para tomar las decisiones finales y para escoger cuáles módulos se pueden hacer comunes a una familia de productos y cuáles no.

La tercera discusión que se propone desde la realización de esta investigación, es referente al índice SMI (ecuación (9)), el cual se usa para medir la modularidad (Hölttä, Suk Suh, & De Weck, 2005). Dicho índice es altamente dependiente del tamaño de la matriz, lo que implica que no puedan compararse dos matrices de diferente tamaño, así que ¿Cómo saber si un producto es más modular que otro si las matrices de los productos que se comparar tienen tamaño diferente? Desde nuestros hallazgos metodológicos podemos asegurar que si dos matrices difieren en su tamaño son incomparables con este índice. Además, entre más grande sean las matrices, más tenderán a cero los valores de SMI. Según lo revisado en la literatura, si el valor de SMI es cercano a uno la matriz es más modular y si se acerca más a cero es más integral (Hölttä, Suk Suh, & De Weck, 2005, pág. 7). Desde nuestra propia experiencia, lo anterior está en contradicción con la variación del índice SMI en función del orden de la matriz, para matrices que representan un producto totalmente integral y otro totalmente modular, como se representa en la siguiente gráfica (Figura 64).

$$SMI = 1/N \arg \min_{\alpha} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_i}{\sigma_1} - e^{-(i-1)/\alpha} \right| \quad (9)$$

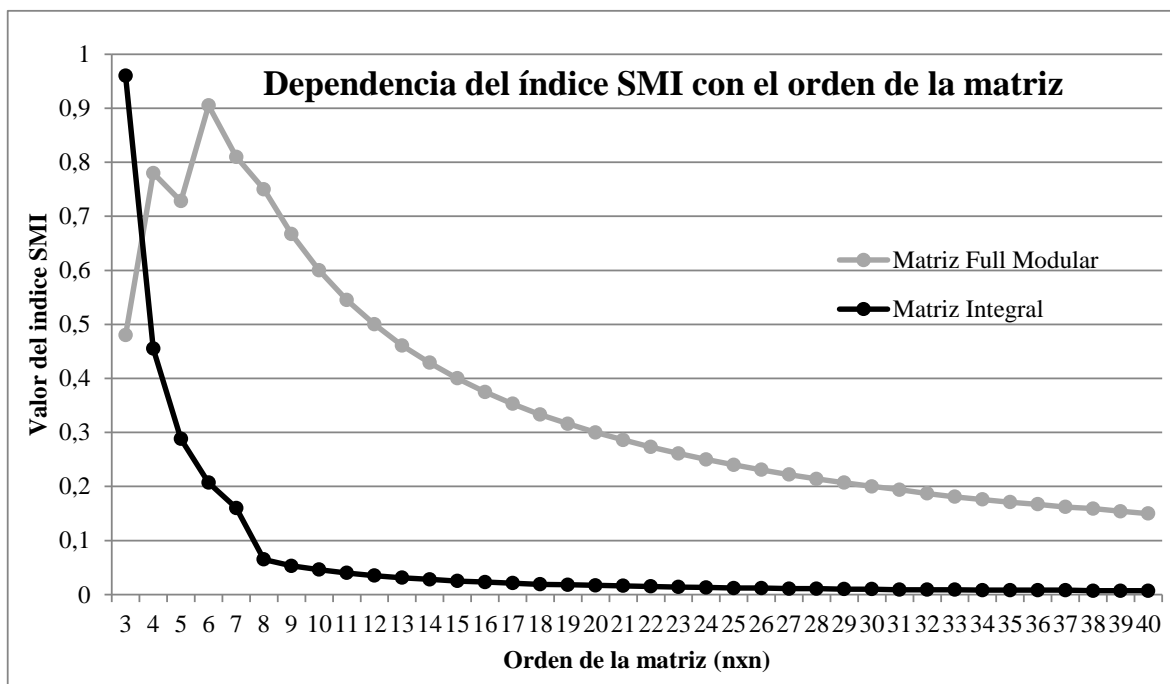


Figura 64. Dependencia del índice SMI con el orden de la matriz.

A mayor orden de la matriz el índice SMI tiende a cero en una matriz para un producto full modular y en una matriz para un producto integral

Teniendo en cuenta que este índice depende del tamaño de la matriz, se consideró la posibilidad de obtener un índice que no dependiera del tamaño de la matriz y que expresara que tan modular o no es un producto después de manipular la matriz de interacción. En esta búsqueda se hicieron algunos cálculos que podían indicar que tan modular puede ser una matriz de interacción. Se avanzó entonces en la propuesta sobre la *Densidad de interacciones en función de los módulos*, relación que compara la cantidad de interacciones por módulo, con la idea de que si hay una interacción por módulo en el producto completo sea más modular que si hay más de una interacción por módulo (ecuación (10)). Lastimosamente, este desarrollo quedará pendiente para posteriores trabajos de investigación, y se incluye como parte de la discusión de las conclusiones de este trabajo para abrir nuevas perspectivas de investigación que pueden involucrar desarrollos transdisciplinarios para nuestro grupo de investigación.

$$\rho_m = \frac{\# \text{ de interacciones entre módulos}}{\# \text{ de módulos}} \quad (10)$$

4.2 Conclusiones generales

El primer aspecto fundamental que se debe resaltar de esta investigación, es que la metodología aquí propuesta partió de herramientas que son usadas comúnmente para el diseño, y se planteó de manera novedosa y creativa la adaptación y validación de éstas para el rediseño de productos. Específicamente en el campo de la modularidad, se debe tener en cuenta que la existencia de metodologías para el rediseño de productos es escasa en la literatura. Sin embargo, las diferentes fases aquí presentadas y sus respectivas formas de

validación, componen una metodología completa, de fácil aplicación a nivel empresarial y pedagógico para la enseñanza del estudio de conceptos fundamentales del diseño y el rediseño de productos.

La metodología que se implementó en esta investigación está diseñada para generar una familia de productos, sin embargo, la Fase 1 se creó de tal manera que se puede hacer la modularización y la distribución de planta de un solo producto, obteniendo verificación en la eficiencia del sistema productivo del producto rediseñado.

Una gran ventaja de aplicar modularidad en los productos y conformar una familia de productos, en especial la metodología expuesta en esta investigación, es que permite tener flexibilidad en la producción, ya que tener módulos comunes permite mantener la empresa operando independientemente de los volúmenes de producción solicitados de cada referencia. Es de resaltar, que dicha flexibilidad permite optimizar el recurso humano al rotar los operarios por las diferentes áreas de trabajo de ensamble de los diferentes módulos para mantener la planta en funcionamiento.

Específicamente, al aplicar la metodología a nuestro caso de estudio, se encontraron dos módulos que conformaron la plataforma de productos y crearon una nueva familia de productos conformada por la licuadora y el procesador de alimentos. Estos módulos fueron M_4^1 y M_4^2 , y M_5^1 y M_5^2 . Al hacer estos módulos iguales, se logró disminuir en un operario, los necesarios para ensamblar ambos productos, y además permitió a la empresa beneficiarse de las economías de escala. Inicialmente se necesitaban 400 insumos diarios para M_4^1 y M_5^1 y 270 insumos diarios para M_4^2 y M_5^2 , mientras que con la plataforma propuesta se pueden solicitar 670 insumos diarios para la misma cantidad de módulos, los cuales fueron igualados con la metodología desarrollada en esta investigación.

Al aplicar la metodología a la licuadora se obtuvo un aumento en la modularidad en un 39.13%, una disminución en los tiempos de ensamble por licuadora del 8,70%, un aumento en la eficiencia de diseño y en la eficiencia de ensamble del 2,79% y 3.80% respectivamente. Con la nueva distribución de planta, de acuerdo a los módulos obtenidos, se aumentó la producción de licuadoras en un 116.67%, y por último llevando la utilización de los módulos a un trabajo de maximización con cuatro operarios, se aumentó en un 262%.

Al aplicar la metodología al procesador de alimentos se obtuvo un aumento en la modularidad en un 59,46%, una disminución en los tiempos de ensamble por procesador de alimentos del 24,22%, un aumento en la eficiencia de diseño y en la eficiencia de ensamble del 2,36% y 2,75% respectivamente. Con la nueva distribución de planta, de acuerdo a los módulos obtenidos, se aumentó en la producción de procesadores de alimentos en un 74,58%, y por último, llevando la utilización de los módulos a un trabajo de maximización con cuatro operarios, se aumentó en un 157,69%.

Teniendo los módulos ya establecidos es posible considerar varias formaciones en la distribución de planta y escoger de acuerdo al número de operarios, a los tiempos de desplazamiento, tiempos de ensamble de los módulos, entre otras variables importantes, la que más se ajuste a las necesidades de la empresa.

En términos empresariales, esta metodología tiene la ventaja de que es de fácilmente aplicable, característica fundamental para la industria, debido a la velocidad con que debe realizarse el lanzamiento de los productos al mercado. A través de la metodología propuesta, se evidenció además, cómo la adaptación de estas herramientas en un producto ya existente genera cambios en la distribución de planta, facilitando la organización en las áreas de ensamble, aumentando la flexibilidad e incrementando los niveles de producción de una empresa. Además, si se requiere, la metodología puede ayudar a implementar una plataforma modular en el caso de tener diferentes productos en la misma empresa. Con la metodología descrita, se encontró que después de la aplicación de las fases se recolecta suficiente información para tomar decisiones acertadas sobre el rediseño de un producto, ya que se tienen las distribuciones de planta como justificación para la validación y legitimación a cualquier decisión tomada en función de modularizar el producto.

Bibliografía

- Andreasen, M. M., Kähler, S., Lund, T., & Swift, K. G. (1988). *Design for assembly* (2 ed.). Berlin, New York, Tokyo, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Baldwin, C. Y., & Clark, K. B. (2000). *Design Rules: The Power of Modularity* (Vol. 1). Cambridge: MIT Press.
- Boothroyd, G. (1996). Design For Manufacture and Assembly: The Boothroyd-Dewhurst Experience. In G. Q. Huang, *Design for X* (pp. 19-40). London: Chapman & Hall.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. (2002). *Product design for manufacture and Assembly* (2 ed.). Boca Raton: CRC Taylor & Francis.
- Cameron, B. G., & Crawley, E. F. (2014). Crafting platform strategy based on anticipated benefits and costs. In T. W. Simpson, J. Jiao, Z. Siddique, & K. Hölttä-Otto, *Advances in product family and product platform design* (pp. 49-70). New York: Springer.
- Daniilidis, C., Enßlin, V., Katharina, E., & Lindemann, U. (2011). A classification framework for product modularization methods. *International conference on engineering design, ICED11*.
- Duray, R., Ward, P. T., Milligan, G. W., & Berry, W. L. (2000). Approaches to mass customization: configurations and empirical validation. *Journal of Operations Management*, 18, 605-625.
- Eder, W., & Hosnedl, S. (2008). *Introduction to Design Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Eder, W., & Hosnedl, S. (2010). *Introduction to design Engineering: Systematic Creativity and Management*. Leiden, Netherlands: CRC Press/Balkema.
- Ericsson, A., & Erixon, G. (2000). *Controlling Design Variants: Modular Product Platforms* (1 ed.). Michigan: Society of Manufacturing Engineers.
- Erixon, G. (1996). Design for Modularity. In G. Q. Huang, & G. Q. Huang (Ed.), *Design for x* (1 ed., pp. 357-379). London: Chapman & Hall.
- Fogliatto, F. S., da Silveira, G. J., & Borenstein, D. (2012). The mass customization decade: An updated review of the literature. *Production Economics*, 138, 14-25.
- García Criollo, R. (2000). *Estudio del trabajo: ingeniería de métodos*. México: McGraw-Hill.
- García Criollo, R. (2006). *Study of work: engineering methods and measurement of work* (7 ed.). México: McGraw-Hill.
- Grossman S., S. (2008). *Álgebra lineal*. México, D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A.
- Gupta, G. E. (2013). Analysis of modularity implementation methods from an assembly and variety viewpoints. *Int J Adv Manuf Technol*, 66, 1959-1976.
- Herrador, B., Aguayo González, F., Lama Ruiz, J., & del Pozo Madroñal, N. (2010). Diseño de plataformas modulares para productos. *Técnica Industrial*.
- Hölttä, K., Suk Suh, E., & De Weck, O. (2005). Tradeoff between modularity and performance for engineered systems and products. Melbourne.

- Höltkä, K., Tang, V., & Seering, W. P. (2003). Modularizing product architectures using dendrograms. *Modularizing product architectures using dendrograms*. STOCKHOLM.
- Höltkä-Otto, K. (2005, agosto 12). Doctoral Dissertation of Modular Product Platform Design. *Modular Product Platform Design*. Helsinki: University of Technology, Laboratory of Machine Design.
- Höltkä-Otto, K., & De Weck, O. (2007). Degree of Modularity in Engineering Systems and Products with Technical and Business Constraints. *CONCURRENT ENGINEERING: Research and Applications*, 15, 113-126.
- Huang, C.-C., & Kusiak, A. (1998). Modularity in Design of Products and Systems. *IEEE, Transactions on systems, man, and cybernetics*.
- Huang, G. Q. (1996). *Design for X: Concurrent engineering imperative*. London: Chapman & Hall.
- Hubka, V., & Eder, W. (1988). *Theory of Technical System: A total Concept Theory for Engineering Design* (2 ed.). (V. Hubka, Trans.) New York: Springer-Verlag.
- Hubka, V., & Eder, W. (1988). *Theory of technical systems*. Germany: Springer-Verlag.
- Hubka, V., & Eder, W. (1996). *Design Science: Introduction to the Needs, Scope and Organization of Engineering Design Knowledge*. London: Springer-Verlag.
- Jiao, J. (., Simpson, T. W., & Siddique, Z. (2007). Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review. *J Intell Manuf*, 18.
- Kroes, P. (1998). Technological explanations: the relation between structure and function of technological objects. *Phil & Thech 3:3 Spring*, 18-34.
- Kroes, P. (2002). Design methodology and the nature of technical artefacts. *Design Estudios Vol 23*, 287-302.
- Li, L., Huang, G. Q., & Newman, S. T. (2007). Interweaving genetic programming and genetic algorithm for structural and parametric optimization in adaptive platform product customization. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23, 650–658.
- Lucas Engineering & Systems Ltd; University of Hull. (1989). *Design for Assembly Practitioners Manual* (5 ed.). Hull: University of Hull.
- Nonaka, I. (2000). The knowledge-creating company. *Harvard Business Review*, 69, 96-104.
- Nonaka, I. (2007). La empresa creadora de conocimiento. *Harvard Business Review*.
- Otto, K., & Wood, K. (2001). *Product design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development* (1 ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach* (3 ed.). London: Springer.
- Pedroza Zapata, A. R., & Ortiz Cantú, S. (2008). Technology's Strategic Management in the Pre-development of New Products. *Journal of Technology Management & Innovation*, 3, 100-111.

- Pirmoradi, Z., Wang, G. G., & Simpson, T. W. (2014). A Review of recent literature in product family design and platform-based product development. In T. W. Simpson, J. (. Jiao, Z. Siddique, & K. Hölttä-Otto, *Advances in product family and product platform design* (pp. 1-46). New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2008). *Física para ciencias e ingeniería* (Séptima ed., Vol. 1). Mexico D.F.: Cengage Learning.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2009). *Física para ciencia e ingeniería con física moderna* (Séptima ed., Vol. 2). Mexico D.F.: Cengage Learning.
- Simpson, T. W., Jiao, J. (. , Siddique, Z., & Hölttä-Otto, K. (2014). *Advances in Product Family and Product Platform Design*. New York: Springer.
- Smith Jr., J., & Culpepper, M. (2002). 2.000 How and Why Machines Work. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare.
- Steward, D. V. (1993). *Using the design structure method*. California State University, Computer Sciences Department. Washington, DC: NSF Report.
- The University of Hull*. (2013). Retrieved from DFA Analysis Overview: http://www.hullhistorycentre.org.uk/discover/mapp/sandpit/dfa/dfa_analysis.aspx
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. (2009). *Diseño y desarrollo de productos*. MC Graw Hill.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. (2012). *Product design and development* (5 ed.). New York: MC Graw Hill.
- Vokurka, R. J., & O’Leary-Kelly, S. W. (2000). A review of empirical research on manufacturing flexibility. *Journal of Operations Management*, 18, 485–501.

Anexos

Anexo 1. Recomendaciones para la aplicación de la Ruta Metodológica para el rediseño modular de productos y la generación de familias de productos.

Fase 1.

Etapa de análisis del producto inicial

- Cuando se desensamble el producto se deben buscar módulos que ayuden el desensamble y no se deben escoger módulos al azar
- Si no se cuenta con los códigos de las partes, los nombres que se le den a las partes deben ser muy explicativos, clarificando muy bien la función que desempeñan, así sean largos los nombres, esto con el fin de tener claridad sobre cada pieza con la que se trabaja.
- Si en el momento de clasificar las piezas ya se tienen algunas soluciones para el rediseño, estas piezas son tipo B independiente de las preguntas, y si al contrario ya se sabe que hay algunas piezas que no se pueden cambiar así las preguntas digan lo contrario, son tipo A.
- Es recomendable trabajar con los tiempos de ensamble reales o sea los tiempos en la planta de producción, pero si no se cuenta con ellos se debe desensamblar y ensamblar el producto muchas veces para acercarse a la experticia que tienen los operarios a la hora de ensamblar los productos y promediar los tiempos que se midieron en los últimos ensambles.
- Los tiempos de ensamble deben estar tomados para los productos completos y por módulos en la medida de lo posible.

Etapa creativa (Fase 1)

- Cuando se está haciendo la identificación de piezas, el intercambio de las filas y la eliminación de piezas para la creación de los módulos rediseñados, se pueden incluir las otras recomendaciones de diseño para el ensamble expuestas en el capítulo dos, como la integración de partes o la eliminación del exceso de cableado.
- Para poder hacer una distribución de planta idónea, se deben hacer varias y compararlas variando el número de operarios y diseñando varias áreas de trabajo diferentes.

Etapa comparativa

- Que las comparaciones no sean como se muestra en la Figura 49 no siempre significa que la modularización sea descartable. Por ejemplo, si el producto modularizado da un número mayor de piezas, se puede continuar el proceso. Si todas las comparaciones son diferentes a lo expuesto, se debe regresar al proceso de modularización para proponer nuevas recomendaciones.

Fase 2.

Etapa de medición

- Esta etapa depende mucho del producto que se esté modularizando, aunque se debe tener en cuenta que entre más medidas se le hagan a cada uno de los módulos más certera es la distancia que va a resultar entre ellos.
- La precisión de las medidas siempre debe ser de acuerdo a lo que realmente se necesite. Hay procesos de medición que son muy costosos y entre más precisión se espere de las medidas mucho más costosos serán estos procedimientos para obtenerlas.

Etapa de comparación entre módulos

- Es importante hacer la comparación cualitativa porque la distancia entre módulos puede arrojar módulos que ni siquiera son comparables y por lo tanto no es posible hacerlos iguales. Sin embargo, es fundamental hacer la distancia entre medidas, porque hay módulos que aparentemente son muy diferentes y la medida cuantitativa podría mostrar su igualdad, que muchas veces no es fácil de ver con la evaluación cualitativa.

Etapa creativa (Fase 2)

- En esta etapa hay dos opciones, una que todos los módulos se hagan iguales a un módulo ya existente y por tanto habría que trabajar en las interfaces de los productos que tenían módulos diferentes. Y dos que se haga un módulo totalmente nuevo que se vuelva común a todos los productos, en este caso habría que trabajar en el módulo y en las interfaces.

Fase 3.

- Esta fase es la menos lineal es de las tres ya que el diseño de áreas de trabajo depende del análisis de eficiencia y viceversa. Hay que empezar con una distribución inicial y cuando se haga el análisis de ésta, se encontrarán posibilidades de mejora que modificarán las áreas de trabajo, y por supuesto los análisis, para volver a modificar las áreas.
- En esta fase es importante tener toda la información clara, ya que todo se debe utilizar para hacer una distribución de planeta óptima.

Etapa creativa (fase 3)

- En esta etapa hay dos opciones una que todos los módulos se hagan iguales a un módulo ya existente por tanto habría que trabajar en las interfaces de los productos que tenían módulos diferentes y dos que se haga un módulo totalmente nuevo que se vuelva común a todos los productos, aquí habría que trabajar en el módulo y en las interfaces.

Fase 3.

- Esta fase es la menos lineal es de las tres ya que el diseño de áreas de trabajo depende del análisis de eficiencia y viceversa, hay que empezar con una distribución inicial y cuando se haga el análisis de esta se encontraran posibilidades de mejora que modificaran las áreas de trabajo y por supuesto los análisis para volver a modificar las áreas.
- En esta fase es importante tener toda la información clara ya que todo se debe utilizar para hacer una distribución de planeta óptima.

Anexo 2. Distancias entre módulos con sus respectivas distancias entre medidas para la licuadora y el procesador de alimentos.

IE ¹² ₁₁	-0,30	IE ¹² ₁₂	-0,30	IE ¹² ₁₃	-0,30	IE ¹² ₁₄	-0,40	IE ¹² ₁₅	1,00
IW ¹² ₁₁	0,00	IW ¹² ₁₂	0,00	IW ¹² ₁₃	0,00	IW ¹² ₁₄	-1,00	IW ¹² ₁₅	-1,00
IS ¹² ₁₁	0,00	IS ¹² ₁₂	0,00	IS ¹² ₁₃	0,00	IS ¹² ₁₄	0,00	IS ¹² ₁₅	0,00
IM ¹² ₁₁	-0,14	IM ¹² ₁₂	1,00	IM ¹² ₁₃	1,00	IM ¹² ₁₄	-0,78	IM ¹² ₁₅	1,00
OE ¹² ₁₁	-0,30	OE ¹² ₁₂	-0,30	OE ¹² ₁₃	-0,30	OE ¹² ₁₄	-0,30	OE ¹² ₁₅	1,00
OW ¹² ₁₁	0,00	OW ¹² ₁₂	0,00	OW ¹² ₁₃	0,00	OW ¹² ₁₄	0,00	OW ¹² ₁₅	-1,00
OS ¹² ₁₁	-0,96	OS ¹² ₁₂	1,00	OS ¹² ₁₃	1,00	OS ¹² ₁₄	-0,92	OS ¹² ₁₅	0,90
OM ¹² ₁₁	-0,14	OM ¹² ₁₂	1,00	OM ¹² ₁₃	1,00	OM ¹² ₁₄	-0,78	OM ¹² ₁₅	1,00
# ¹² ₁₁	-0,14	# ¹² ₁₂	-0,25	# ¹² ₁₃	0,42	# ¹² ₁₄	-0,50	# ¹² ₁₅	0,92
P ¹² ₁₁	-0,44	P ¹² ₁₂	0,63	P ¹² ₁₃	0,89	P ¹² ₁₄	-0,60	P ¹² ₁₅	0,99
V ¹² ₁₁	-0,50	V ¹² ₁₂	0,71	V ¹² ₁₃	0,97	V ¹² ₁₄	-0,37	V ¹² ₁₅	0,99
#I ¹² ₁₁	-0,25	#I ¹² ₁₂	-0,57	#I ¹² ₁₃	-0,40	#I ¹² ₁₄	-0,75	#I ¹² ₁₅	0,33
T ¹² ₁₁	-0,42	T ¹² ₁₂	-0,55	T ¹² ₁₃	-0,72	T ¹² ₁₄	-0,90	T ¹² ₁₅	0,96
D ¹² ₁₁	1,36	D ¹² ₁₂	2,18	D ¹² ₁₃	2,40	D ¹² ₁₄	2,33	D ¹² ₁₅	3,26

IE ¹² ₂₁	-1,00	IE ¹² ₂₂	-1,00	IE ¹² ₂₃	-1,00	IE ¹² ₂₄	-1,00	IE ¹² ₂₅	0,00
IW ¹² ₂₁	0,00	IW ¹² ₂₂	0,00	IW ¹² ₂₃	0,00	IW ¹² ₂₄	-1,00	IW ¹² ₂₅	-1,00
IS ¹² ₂₁	0,00	IS ¹² ₂₂	0,00	IS ¹² ₂₃	0,00	IS ¹² ₂₄	0,00	IS ¹² ₂₅	0,00
IM ¹² ₂₁	0,58	IM ¹² ₂₂	1,00	IM ¹² ₂₃	1,00	IM ¹² ₂₄	-0,39	IM ¹² ₂₅	1,00
OE ¹² ₂₁	-1,00	OE ¹² ₂₂	-1,00	OE ¹² ₂₃	-1,00	OE ¹² ₂₄	-1,00	OE ¹² ₂₅	0,00
OW ¹² ₂₁	0,00	OW ¹² ₂₂	0,00	OW ¹² ₂₃	0,00	OW ¹² ₂₄	0,00	OW ¹² ₂₅	-1,00
OS ¹² ₂₁	-0,98	OS ¹² ₂₂	1,00	OS ¹² ₂₃	1,00	OS ¹² ₂₄	-0,96	OS ¹² ₂₅	0,79
OM ¹² ₂₁	0,58	OM ¹² ₂₂	1,00	OM ¹² ₂₃	1,00	OM ¹² ₂₄	-0,39	OM ¹² ₂₅	1,00
# ¹² ₂₁	-0,57	# ¹² ₂₂	-0,63	# ¹² ₂₃	-0,14	# ¹² ₂₄	-0,75	# ¹² ₂₅	0,83
P ¹² ₂₁	-0,51	P ¹² ₂₂	0,59	P ¹² ₂₃	0,88	P ¹² ₂₄	-0,65	P ¹² ₂₅	0,98
V ¹² ₂₁	-0,53	V ¹² ₂₂	0,69	V ¹² ₂₃	0,96	V ¹² ₂₄	-0,40	V ¹² ₂₅	0,99
#I ¹² ₂₁	0,50	#I ¹² ₂₂	0,13	#I ¹² ₂₃	0,38	#I ¹² ₂₄	-0,33	#I ¹² ₂₅	0,75
T ¹² ₂₁	-0,65	T ¹² ₂₂	-0,73	T ¹² ₂₃	-0,83	T ¹² ₂₄	-0,94	T ¹² ₂₅	0,93
D ¹² ₂₁	2,28	D ¹² ₂₂	2,60	D ¹² ₂₃	2,75	D ¹² ₂₄	2,52	D ¹² ₂₅	2,95

IE ¹² ₃₁	-0,30	IE ¹² ₃₂	-0,30	IE ¹² ₃₃	-0,30	IE ¹² ₃₄	-0,40	IE ¹² ₃₅	1,00
IW ¹² ₃₁	0,00	IW ¹² ₃₂	0,00	IW ¹² ₃₃	0,00	IW ¹² ₃₄	-1,00	IW ¹² ₃₅	-1,00
IS ¹² ₃₁	0,00	IS ¹² ₃₂	0,00	IS ¹² ₃₃	0,00	IS ¹² ₃₄	0,00	IS ¹² ₃₅	0,00
IM ¹² ₃₁	-1,00	IM ¹² ₃₂	0,00	IM ¹² ₃₃	0,00	IM ¹² ₃₄	-1,00	IM ¹² ₃₅	0,00
OE ¹² ₃₁	-0,30	OE ¹² ₃₂	-0,30	OE ¹² ₃₃	-0,30	OE ¹² ₃₄	-0,30	OE ¹² ₃₅	1,00
OW ¹² ₃₁	0,00	OW ¹² ₃₂	0,00	OW ¹² ₃₃	0,00	OW ¹² ₃₄	0,00	OW ¹² ₃₅	-1,00
OS ¹² ₃₁	-1,00	OS ¹² ₃₂	0,00	OS ¹² ₃₃	0,00	OS ¹² ₃₄	-1,00	OS ¹² ₃₅	-1,00
OM ¹² ₃₁	-1,00	OM ¹² ₃₂	0,00	OM ¹² ₃₃	0,00	OM ¹² ₃₄	-1,00	OM ¹² ₃₅	0,00
# ¹² ₃₁	-0,79	# ¹² ₃₂	-0,81	# ¹² ₃₃	-0,57	# ¹² ₃₄	-0,88	# ¹² ₃₅	0,67
P ¹² ₃₁	-0,98	P ¹² ₃₂	-0,89	P ¹² ₃₃	-0,64	P ¹² ₃₄	-0,98	P ¹² ₃₅	0,66
V ¹² ₃₁	-1,00	V ¹² ₃₂	-0,97	V ¹² ₃₃	-0,78	V ¹² ₃₄	-1,00	V ¹² ₃₅	0,16
#I ¹² ₃₁	0,00	#I ¹² ₃₂	-0,43	#I ¹² ₃₃	-0,20	#I ¹² ₃₄	-0,67	#I ¹² ₃₅	0,50
T ¹² ₃₁	-0,75	T ¹² ₃₂	-0,81	T ¹² ₃₃	-0,88	T ¹² ₃₄	-0,96	T ¹² ₃₅	0,90
D ¹² ₃₁	2,51	D ¹² ₃₂	1,85	D ¹² ₃₃	1,53	D ¹² ₃₄	2,89	D ¹² ₃₅	2,64

IE ¹² ₄₁	-0,18	IE ¹² ₄₂	-0,18	IE ¹² ₄₃	-0,18	IE ¹² ₄₄	-0,30	IE ¹² ₄₅	1,00
IW ¹² ₄₁	1,00	IW ¹² ₄₂	1,00	IW ¹² ₄₃	1,00	IW ¹² ₄₄	-0,09	IW ¹² ₄₅	-0,09

IS_{41}^{12}	0,00
IM_{41}^{12}	-1,00
OE_{41}^{12}	-0,30
OW_{41}^{12}	0,00
OS_{41}^{12}	-0,95
OM_{41}^{12}	-1,00
$\#_{41}^{12}$	0,00
P_{41}^{12}	0,13
V_{41}^{12}	-0,86
$\#I_{41}^{12}$	0,56
T_{41}^{12}	0,77
D_{41}^{12}	2,39

IS_{42}^{12}	0,00
IM_{42}^{12}	0,00
OE_{42}^{12}	-0,30
OW_{42}^{12}	0,00
OS_{42}^{12}	1,00
OM_{42}^{12}	0,00
$\#_{42}^{12}$	-0,13
P_{42}^{12}	0,82
V_{42}^{12}	-0,06
$\#I_{42}^{12}$	0,22
T_{42}^{12}	0,71
D_{42}^{12}	1,83

IS_{43}^{12}	0,00
IM_{43}^{12}	0,00
OE_{43}^{12}	-0,30
OW_{43}^{12}	0,00
OS_{43}^{12}	1,00
OM_{43}^{12}	0,00
$\#_{43}^{12}$	0,50
P_{43}^{12}	0,95
V_{43}^{12}	0,87
$\#I_{43}^{12}$	0,44
T_{43}^{12}	0,53
D_{43}^{12}	2,12

IS_{44}^{12}	0,00
IM_{44}^{12}	-1,00
OE_{44}^{12}	-0,30
OW_{44}^{12}	0,00
OS_{44}^{12}	-0,90
OM_{44}^{12}	-1,00
$\#_{44}^{12}$	-0,42
P_{44}^{12}	-0,18
V_{44}^{12}	-0,83
$\#I_{44}^{12}$	-0,25
T_{44}^{12}	-0,25
D_{44}^{12}	2,00

IS_{45}^{12}	0,00
IM_{45}^{12}	0,00
OE_{45}^{12}	1,00
OW_{45}^{12}	-1,00
OS_{45}^{12}	0,92
OM_{45}^{12}	0,00
$\#_{45}^{12}$	0,93
P_{45}^{12}	0,99
V_{45}^{12}	0,98
$\#I_{45}^{12}$	0,78
T_{45}^{12}	0,99
D_{45}^{12}	2,87

IE_{51}^{12}	-1,00
IW_{51}^{12}	1,00
IS_{51}^{12}	0,00
IM_{51}^{12}	-1,00
OE_{51}^{12}	-1,00
OW_{51}^{12}	1,00
OS_{51}^{12}	-1,00
OM_{51}^{12}	-1,00
$\#_{51}^{12}$	-0,93
P_{51}^{12}	-0,99
V_{51}^{12}	-1,00
$\#I_{51}^{12}$	-0,50
T_{51}^{12}	-0,98
D_{51}^{12}	3,32

IE_{52}^{12}	-1,00
IW_{52}^{12}	1,00
IS_{52}^{12}	0,00
IM_{52}^{12}	0,00
OE_{52}^{12}	-1,00
OW_{52}^{12}	1,00
OS_{52}^{12}	1,00
OM_{52}^{12}	0,00
$\#_{52}^{12}$	-0,94
P_{52}^{12}	-0,97
V_{52}^{12}	-0,98
$\#I_{52}^{12}$	-0,71
T_{52}^{12}	-0,98
D_{52}^{12}	3,04

IE_{53}^{12}	-1,00
IW_{53}^{12}	1,00
IS_{53}^{12}	0,00
IM_{53}^{12}	0,00
OE_{53}^{12}	-1,00
OW_{53}^{12}	1,00
OS_{53}^{12}	1,00
OM_{53}^{12}	0,00
$\#_{53}^{12}$	-0,86
P_{53}^{12}	-0,89
V_{53}^{12}	-0,83
$\#I_{53}^{12}$	-0,60
T_{53}^{12}	-0,99
D_{53}^{12}	2,93

IE_{54}^{12}	-1,00
IW_{54}^{12}	-0,09
IS_{54}^{12}	0,00
IM_{54}^{12}	-1,00
OE_{54}^{12}	-1,00
OW_{54}^{12}	1,00
OS_{54}^{12}	-1,00
OM_{54}^{12}	-1,00
$\#_{54}^{12}$	-0,96
P_{54}^{12}	-1,00
V_{54}^{12}	-1,00
$\#I_{54}^{12}$	-0,83
T_{54}^{12}	-1,00
D_{54}^{12}	3,25

IE_{55}^{12}	0,00
IW_{55}^{12}	-0,09
IS_{55}^{12}	0,00
IM_{55}^{12}	0,00
OE_{55}^{12}	0,00
OW_{55}^{12}	-0,09
OS_{55}^{12}	-0,67
OM_{55}^{12}	0,00
$\#_{55}^{12}$	0,00
P_{55}^{12}	-0,10
V_{55}^{12}	-0,12
$\#I_{55}^{12}$	0,00
T_{55}^{12}	0,00
D_{55}^{12}	0,70

Anexo 3. Propuestas de cambios que no se implementaron

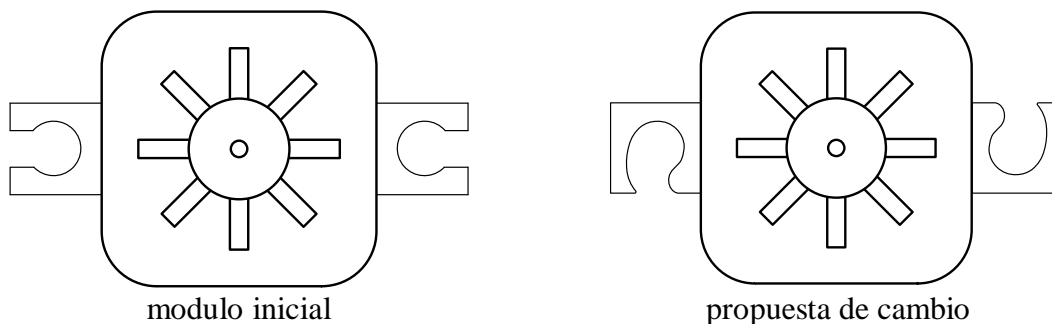
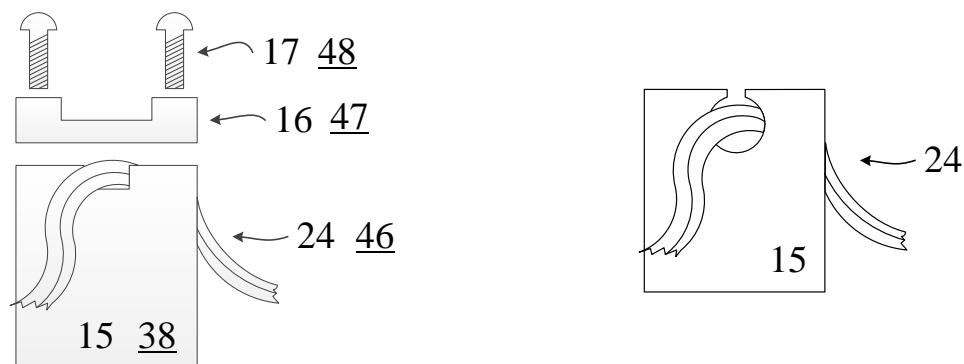


Figura 65. Comparación del motor de la licuadora con una propuesta de cambio que no se implemento

Se propuso para el motor de la licuadora, cambiar la sujeción a la base como se muestra en la Figura 65, en vez del cambio realizado a los empaques en la Figura 31. No se implementó este cambio porque la rotación del motor podía generar que la sujeción de las pestañas se aflojara por la forma en la que se iban a diseñar.



modulo inicial

propuesta de cambio

Figura 66. Comparación de una parte de la base con una propuesta de cambio que no se implemento

El cambio mostrado en la Figura 66 se iba a proponer a la licuadora y al procesador de alimentos simultáneamente como se propuso el cambio mostrado en la Figura 32 para el cable de alimentación, pero esta pieza tal y como se pensaba cambiar es muy difícil de desmoldar por la forma del orificio, además que no cumple con la función de evitar que hayan jalones en las uniones del cable de alimentación y el motor si se jala el cable de alimentación.

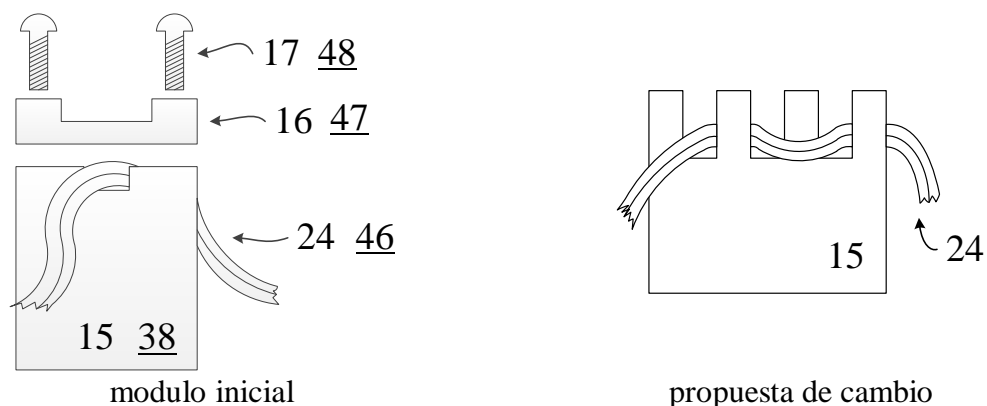


Figura 67. Comparación de una parte de la base con una propuesta de cambio que no se implemento

El cambio mostrado en la Figura 67Figura 66 se iba a proponer a la licuadora y al procesador de alimentos simultáneamente como se propuso el cambio mostrado en la Figura 32 para el cable de alimentación, Aunque este último cambio transfería la fuerza que se le hiciese al cable de alimentación a la base, es más económico el cambio propuesto en la Figura 32 y por esta razón se decidió por el cambio expuesto en el texto principal.

Anexo 4. Posibilidades de distribuciones de planta para el procesador de alimentos

En este anexo se presentan algunas posibilidades que se exploraron para el procesador de alimentos en donde se observa la cantidad de procesadores de alimentos ensamblados al día y un aumento calculado en función del caso 0m para los módulos antes de modularizar (m) (Tabla 41) y un aumento calculado en función del caso 3m para los productos después de modularizar (M) (Tabla 42).

Tabla 41. Posibilidades en la distribución de planta para el procesador de alimentos antes de modularizar.

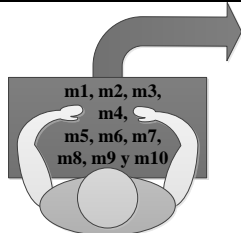
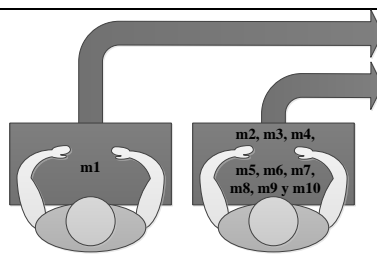
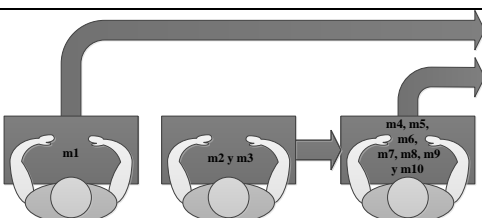
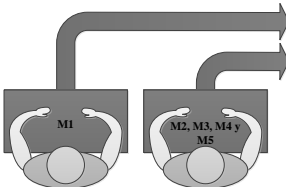
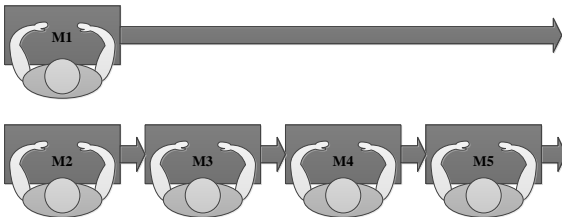
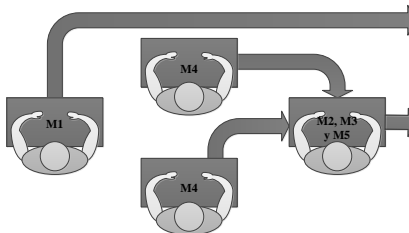
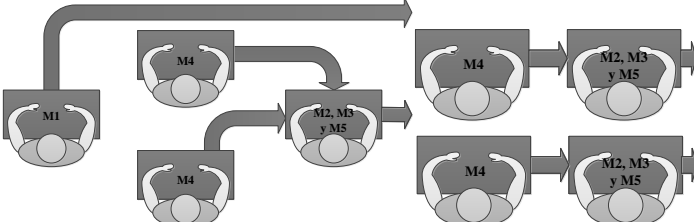
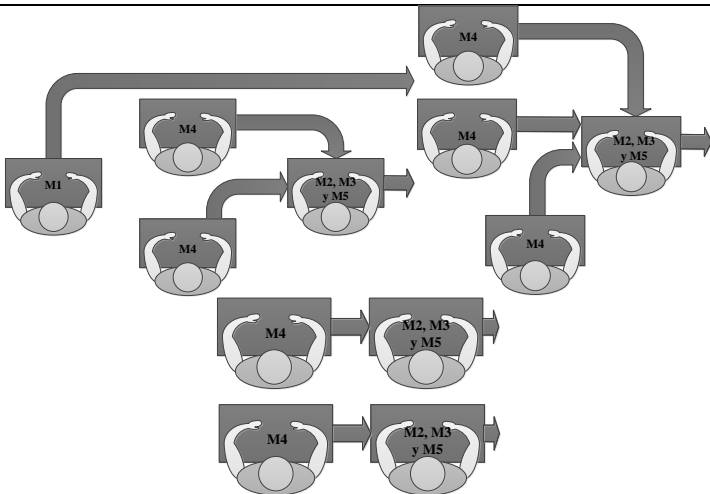
Caso	0m		
Un solo puesto de trabajo ensamblando Procesadores de alimentos			
# de Procesadores de alimentos diarios	29		
Caso	1m		
Ensamblar m1 y ensamblar el resto dos puestos de trabajo			
# de Procesadores de alimentos diarios	32	Aumento 10%	
Caso	2m		
3 puestos de trabajo			
# de Procesadores de alimentos diarios	52	Aumento 79,31%	

Tabla 42. Posibilidades en la distribución de planta para el procesador de alimentos después de modularizar.

Caso	0		
Dos puestos de trabajo ensamblando Procesadores de alimentos			
# de Procesadores de alimentos diarios	37	Aumento -29%	
Caso	1		
5 puestos de trabajo uno por modulo			
# de Procesadores de alimentos diarios	59	Aumento 13%	
Caso	3		
Ensamblar M1, ensamblar M4 en dos puestos de trabajo ensamblar el resto			
# de Procesadores de alimentos diarios	103	Aumento 98,08%	
Caso	4		
unas horas caso 3, unas horas caso 5			
# de Procesadores de alimentos diarios	118	Aumento 126,92%	
Caso	5		
unas horas caso 3, unas horas caso 4 y unas horas caso 5			
# de Procesadores de alimentos diarios	134	Aumento 157,69%	

Anexo 5. Artículo “Modular redesign methodology for improving plant layout”

Este artículo fue presentado el día 17 de junio de 2014 en la revista internacional *Journal of Engineering Design* y se está a la espera de la aprobación. A continuación se anexa el manuscrito que se envió.

Modular redesign methodology for improving plant layout

Author Note

Sebastián Lugo-Márquez, MS degree candidate, Universidad EAFIT, Medellín, Postal Address: Carrera 49 N° 7 Sur – 50, bloque 19 oficina 509, Universidad EAFIT, Telephone: (574) 2619500 ext 9641, Email addresses: slugoma@eafit.edu.co

W. Ernst Eder, Dr. Ing. M.Sc. Mechanical Engineering, professor Emeritus of Royal Military College of Canada, Postal Address: PO Box 17000, Station Forces, Kingston, Ontario CANADA, K7K 7B4, Telephone: (613) 541-6000 ext 6371, Fax: (613) 542-8612, Email addresses: eder-e@kos.net.

Oliver Rubio, M. Sc. Engineering, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, Postal Address: Carrera 49 N° 7 Sur – 50, bloque 19 oficina 509, Universidad EAFIT, Telephone: (574) 2619500 ext 9641, Email addresses: orubiom@eafit.edu.co

Álvaro Guarín Grisales, PhD in Mechanical Engineering, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, Postal Address: Carrera 49 N° 7 Sur – 50, bloque 19 oficina 509, Universidad EAFIT, Telephone: (574) 2619500 ext 9641, Email addresses: aguarin@eafit.edu.co

Modular redesign methodology for improving plant layout

Sebastián Lugo-Márquez^{a*}, W. Ernst Eder^b, Oliver Rubio^c, Álvaro Guarín Grisales^d

^aMS degree candidate, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, ^bDr. Ing. M.Sc. Mechanical Engineering, professor Emeritus of Royal Military College of Canada, ^cM. Sc. Engineering, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia, ^dPhD in Mechanical Engineering, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia.

ABSTRACT

This research aims to show how redesigning a product, specifically modular redesign, may lead to changes in factory internal plant distribution increasing the production levels of a company. This increase was achieved by implementing a new methodology that will be widely discussed in this article and that includes the whole redesigning process of products, from disassembly to plant layout. For this research, tools used include Functional Analysis, Design Structure Matrix, Design for Assembly (DFA), Diagram of Operations and some management concepts of the platform of a modular product.

Keywords: Design for assembly, Modularity and standardization, design-for-X, Product redesign, Design for assembly; Design for modularity;

1. INTRODUCTION

It is evident that contemporary technology changes very fast (Pedroza Zapata & Ortiz Cantú, 2008). As each time more products come to the market, they easily lose validity, change market value and may decrease their profit margins, even turning them into obsolete and useless products (Nonaka, 2000). The introduction of new products to the market is becoming increasingly difficult due to the competition, fashion trends, the

* Corresponding author. Email: slugoma@eafit.edu.co

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

implementation shortage of appropriate technologies and the complexity of the legislation. Moreover, historically, most industries have offered products with shorter life cycles, while consumers demand higher quality products with more guarantees.

To meet the customer's needs it is necessary that companies have production plants that are organized and flexible (Vokurka & O'Leary-Kelly, 2000). Meaning that, according to the products that the company wants to launch in the market, it should have the possibility to make changes in their manufacturing and assembly processes, and even in the plant distribution.

To facilitate flexibility of organization and business, modular design of a product is essential, since from the conception of the product, the layout of the production plant needs to be considered. In the case of products redesign, which as its name suggests start from existing products, modular redesign allows improvements in the layout of a plant that is already operating; reducing assembly and manufacturing times, and making it more flexible in order to develop a great variety of products at lower costs and with shorter delivery times (Gupta, 2013).

Ulrich and Eppinger (Ulrich & Eppinger, 2012, p. 185) define modularity as the most important feature of the product architecture – understanding architecture as "the scheme by which the functional elements of the product are accommodated in physical parts, and through which the parts interact". Therefore, for Ulrich, modularity is a way of organizing the architecture of a product through interacting parts. The term modularity has also been used to describe the use of common units and the ability to create, in a simpler way, variants of a product by changing only some of its modules (Huang & Kusiak, 1998). Likewise, for Ulrich modular products are integral substructures of a physical product that have one-to-one correspondence with a subset of the functional model of a product (Otto & Wood, 2001, p. 361) or like Pahl *et al*, (Pahl, Beitz, Feldhusen, & Grote, 2007, p. 495) would say: "a modular product can be defined by machines, assemblies, and components that fulfill diversified general functions through the combination of different building blocks or modules".

Since global markets are increasingly segmented, the modular architecture of products is being implemented for new product designs in a growing number of companies (Daniilidis, Enßlin, Katharina, & Lindemann, 2011). This leads to common modules

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

which promote the purchase of high volumes of the same material, and brings benefits of economies of scale. Furthermore, the modular architecture provides the ability to adapt products to different markets, having some modules as variant modules, and it is worth highlighting that, when working in a modular fashion, modules are easily disassembled, recycled and reused (Erixon, 1996, p. 358).

This research aims to show how, when a product is transformed into a more modular product, the layout of plant and its productivity can be improved, reducing assembly times and optimizing the arrangement of the workstations within the plant to manufacture the final product more efficiently. In order to accomplish this, an already existing product was taken as an illustrative example, a SAMURAI blender model FACICLIC black (Figure 1). First, a starting study of the product is performed with the following steps: complete disassembly of the product, functional analysis (Otto & Wood, 2001), structure of the design structure matrix (Steward, 1993), measurement of the assembly times and completion of the operations diagram (García Criollo, 2006). Following this study, changes that achieve a more modular product are implemented, always taking into account the assembly and functionality of the product, through a specific manipulation of the design structure matrix used by the methodology DFA (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002) and Lucas (Lucas Engineering & Systems Ltd; University of Hull, 1989) to validate the changes made to the matrix. Finally, a modular layout of plant was built, creating “small factories within factories” (Ericsson & Erixon, 2000, p. 102), where the modules were independently sub- assembled to later assemble them into the complete product, which will allow the company to "reduce internal complexity, increase flexibility and create a proactive organization” (Ericsson & Erixon, 2000, p. 93) in order to increase its profitability and reduce assembly times.



Figure 1. Blender SAMURAI (model FACICLIC) see also Figure 2

2. METHODOLOGICAL RESOURCES

For this research, a set of known tools was used, which are frequently employed in product design. However, this project is focused on the redesign of products rather than on its novel design; these tools were used with a new approach adapted to our perspective. In order to understand the product objectively, functional analysis was used as presented by Otto and Wood (Otto & Wood, 2001, pp. 162-177). The interaction matrix of Huang and Kusiak (Huang & Kusiak, 1998), based on Steward (Steward, 1993), was an essential tool to demonstrate the interactions between the parts and between the modules. To validate the changes made to the product, DFA of Boothroyd *et al* (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002) was used. The operations diagram as presented by Garcia (García Criollo, 2006) facilitated the understanding of the order in which the assembly should be performed. Finally, the changes of layout of the production plant for the blender, specifically the distribution of the assembly points, were based on the platform management proposed by Ericsson and Erixon (Ericsson & Erixon, 2000).

3. DEVELOPED METHODOLOGY

3.1 Disassemble

The first step that was carried out to modularize the product was to disassemble it and choose the initial modules, which were chosen prioritizing an easy disassembly; -- looking for the grouping of parts that facilitate disassembly. These selected groups were named with the letter "m". This selection of the product modules can be made intuitively as was done in this investigation or it can be performed using the previously named methodologies such as the ones exposed by Ulrich and Eppinger (Ulrich & Eppinger, 2012, pp. 194-195) or the heuristic model of Otto and Wood (Otto & Wood, 2001, pp. 379-390), which consist respectively of identifying and outlining the architecture of the product, and selecting some flows to name them as modules through the functional diagram.

For the correct understanding of this research and to facilitate the explanation of its procedure, a name and a number was assigned to each part of the product and the parts were grouped in the initial modules (Figure 2). It should be clarified that the number of units of each part is not explicit because it does not bring anything new to the purpose of this research. Therefore, whenever identical parts were presented, such as the blade gasket, they were taken as a single part. The parts that connect the modules and that can be part of the interface, such as in this case the screws, are included in one of the modules that are connected. However, it should be highlight that the parts that connect the modules could not be considered belonging to the number of parts of any module, causing the decrease in the interactions between these two modules and affording the availability of these parts in the interface for further analysis.

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

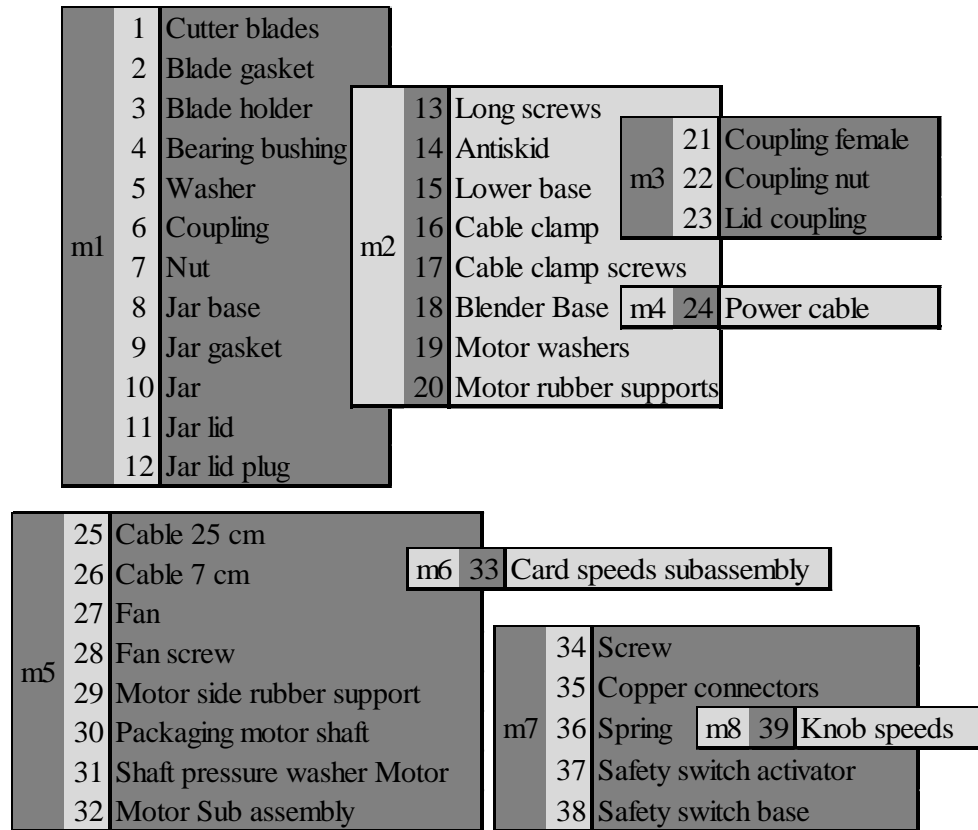


Figure 2. Blender disassemble

Legend: first column: module number, second column: part number, third column: name of the part.

3.2 Functional Analysis

To understand the operation of the product and know the function carried out by each part, a functional diagram was prepared using the denominations recommended by Otto and Wood (Table 1) (Otto & Wood, 2001, p. 172). This is a starting point for the blender to remain a blender and that the proposed modular redesign does not affect the blender (see Figure 3).

Table 1. Function classes, Basic Functions and Synonyms of Otto and Wood (Otto & Wood, 2001, p. 172) for functional analysis

Class	Basic	Flow class restricted	Synonyms
Channel	Import		Input, Receive, Allow, Form Entrance, Capture
	Export		Discharge, Eject, Dispose, Remove

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

	Transfer	Transport (M)	Lit, Move
		Transmit (E)	Conduct, Covey
	Guide	Translate	Direct, Straighten, Steer
		Rotate	Turn, Spin
		Allow (Degrees of freedom)	Constrain, Unlock
Support	Stop		Insulate, Protect, Prevent, Shield, Inhibit
	Stabilize		Steady
	Secure		Attach, Mount, Lock, Fasten, Hold
	Position		Orient, Align, Locate
Connect	Couple		Join, Assemble, Attach
	Mix		Combine, Blend, Add, Pack, Coalesce
Branch	Separate		Switch, divide, release, detach, disconnect, disassemble, subtract, valve
		Remove (M)	Cut, Polish, Sand, Drill, Lathe
	Refine		Purify, Strain, Filter, Percolate, clear
	Distribute		Diverge, Scatter, Disperse, Diffuse, Empty
	Dissipate		Absorb, Dampen, Dispel, Diffuse, Resist
Provision	Store		Contain, Collect, Reserve, Capture
	Supply		Fill, Provide, Replenish, Expose
	Extract		
Control magnitude	Actuate		Start, initiate
	Regulate		Control, Allow, Prevent, Enable/Disable, Limit, Interrupt
	Change		Increase, Decrease, Amplify, Reduce, Magnify, Normalize, Multiply, Scale, Rectify, Adjust
	Form		Compact, Crush, Shape, Compress, Pierce
Convert	Convert		Transform, Liquefy, Solidify, Evaporate, Condense, Integrate, Differentiate, Proses
Signal	Sense		Perceive, Recognize, Discern, Check, Locate
	Indicate		Mark
	Display		
	Measure		Calculate

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

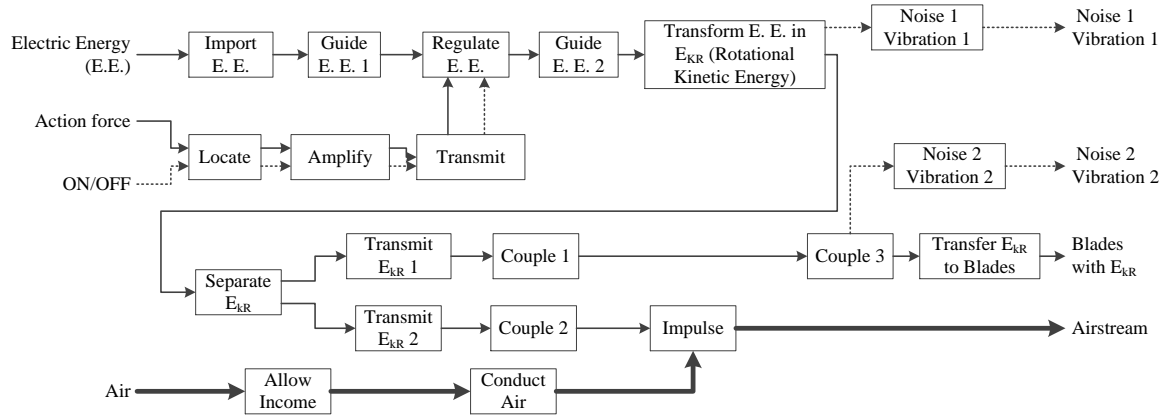


Figure 3. Functional diagram of the blender

The different flows that comprise the correct operation of the blender: (a) inflows are electricity, manpower (and commands, signals), air coming into the blender; (b) outflows are the decreased internal heat, hot air, noise, rotational energy to move the blades of the blender. NOTE: this diagram does not include non-flow functions.

3.3 Interaction matrix

For this research, the interaction matrix and the procedure used by Kusiak and Huan (Huang & Kusiak, 1998) was considered, "the interaction matrix, $A = [a_{ij}]_{m \times m}$ is an incidence matrix component by component, where a_{ij} represents the interaction between components j ; $i, j \in C$ and $C = \{1, 2, \dots, m\}$ the set of integers representing the number of rows and columns. This symmetrical matrix allows viewing the interactions between each of the parts in a complete manner (Figure 4).

To create the interaction matrix, the first column and the first row shows the numbers assigned to the parts, in the order of disassembly, to then define how each of the parts interacts with each of the others. Contact between the parts i and j was denoted with a one (1) in the box that intersects them. The map of *ones* that is created in the matrix depends on the order in which the parts have been located in the columns (or in the rows), for this reason when the blender was disassembled the parts were grouped into subassemblies. This way of disassembly allows viewing in the matrix the groups of parts that interact more. (Steward, 1993)

The interaction matrix evidenced eight different main modules which have parts with a large number of interactions within each module, except for m4, m6 and m8 that are

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

shown with a single part. It was assumed that these parts are assembled or manufactured somewhere else and enter as supplies into the production line. There are interactions of parts outside of these modules which correspond to the interactions that exist between the different modules (Figure 4).

Each interaction between parts shown in figure 4 represents an “elemental organ” according to the Hubka approach (Hubka & Eder, Theory of Technical System: A total Concept Theory for Engineering Design, 1988, pp. 20, 21, 22). Each module represents an “organ group”. Each such organ and/or organ group is capable of performing one or more actions, a “TS-internal and/or cross-boundary functions” of the technical system (TS) – these are by definition either “flow” or “non-flow” functions according to Otto and Wood (Otto & Wood, 2001).

Part 1 in figure 4A is a fixed sub-assembly of the shaft and the cutter blades, as a module delivered from a separate supplier – a sub-module of module **m1**. The interaction organ between parts 1 and 4 has the functions: “guide part 1 rotationally”, and “provide life-long oil lubrication”. Part 4 is a sinter-bronze oil-retaining bearing

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

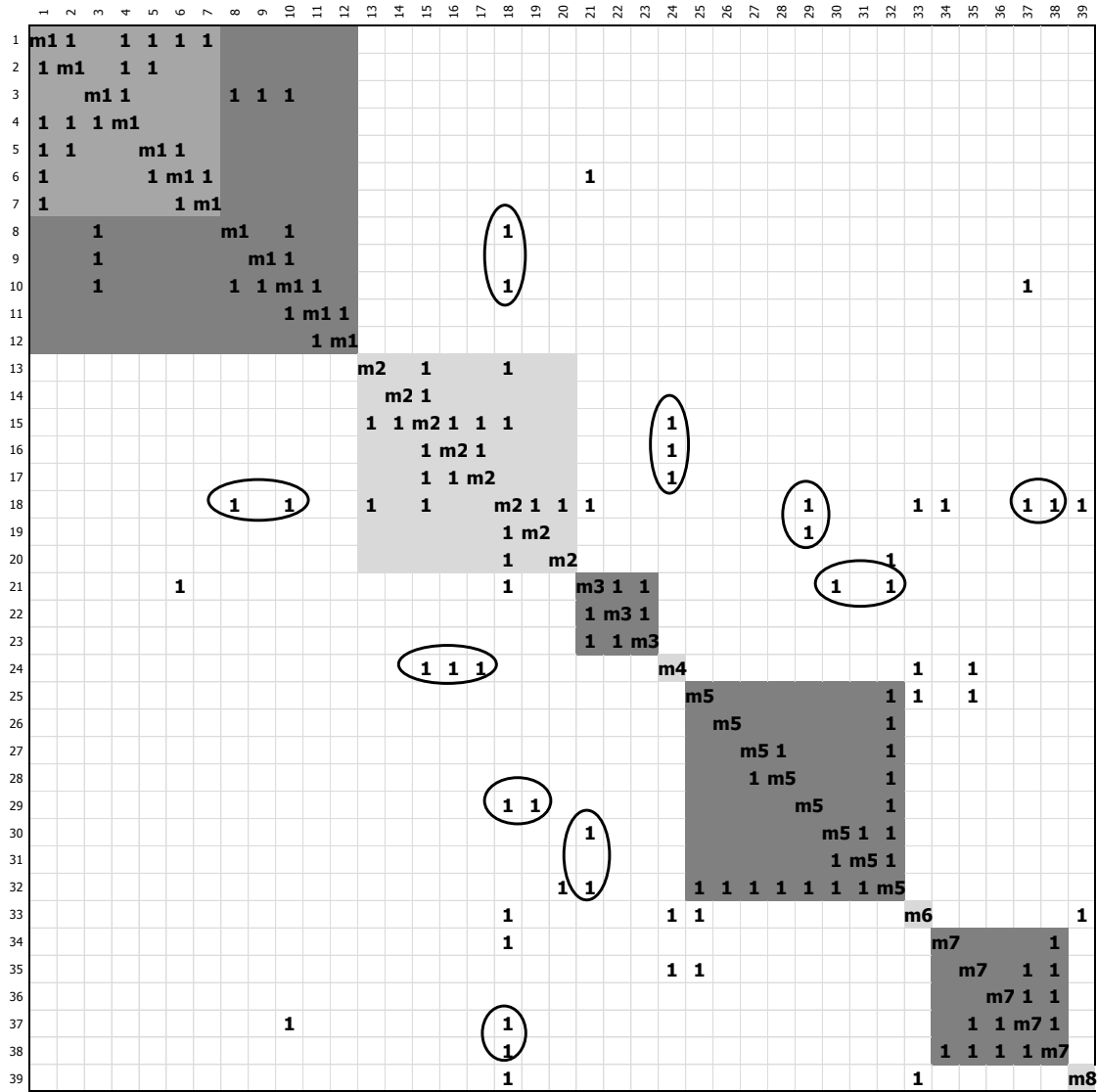


Figure 4. Interaction matrix

The numbers to the left and at the top of the matrix represent the numbering of parts, *ones* symbolize the interactions between the parts, the gray boxes demarcate the initial modules and the ovals show the interactions that are candidates to be modified.

The interactions between parts 1 and 2, parts 2 and 3 (2 locations), parts 2 and 5, and parts 5 and 6 have the function “retain part 1 axially”. Parts 1 – 7 form a sub-module or organ group that has the overall functions “retain the cutter blade sub-assembly, part 1, axially fixed but rotationally free with life-long lubrication” and “transmit rotation and energy to the cutter blades”. For the user of this blender, the strict instructions are that this organ group shall not be disassembled by the user, and that it shall only be cleaned

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

under running water, it shall not be immersed under water. All other parts of the blender jar assembly can and should be disassembled for cleaning and washing.

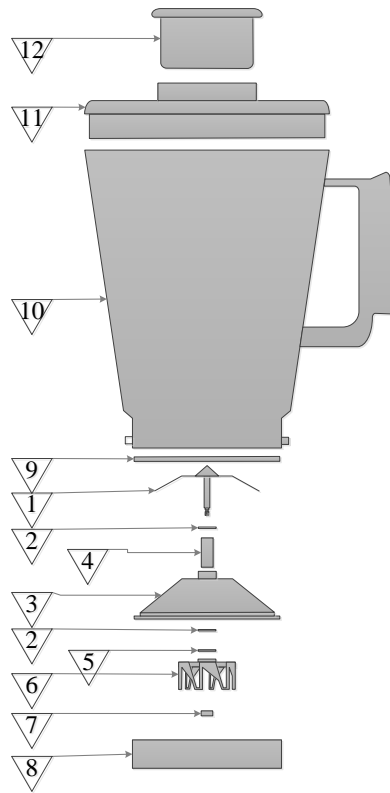


Figure 5 Exploded View of the blender jar

The interaction of parts 6 and 32 has the function “transmit motor rotation and energy to the cutter blades”.

Such co-ordination among the individual parts, the interaction matrix, and recognizing the functions of each interaction helps the re-designer to understand the way of existence and operation of the product. It therefore helps in allowing recognition of and avoidance of errors, potential failures and manufacturing difficulties.

3.4 DFA in function of the interaction matrix

Product evaluation of the interaction matrix with DFA (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002) in function of the interaction matrix was focused on removing and realigning the *ones* that were outside the modules. According to Hölttä *et al* (Hölttä, Suk Suh, & De Weck, 2005), a completely modular product is one in which each of its

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

modules interacts once with the rest. Therefore, the first aim was to decrease the interactions that are integral within the different modules, and then proceeded to decrease the interactions between a single part and the different modules without taking into account the module to which it belongs. Since the elimination of a *one* in the matrix has strong implications in the product it is important that each improvement proposal is validated by DFA, theory that requires to assess the scope of each possible change in the final product, keeping intact its functionality and performance. One goal of this process is to make the interactions matrix as modular as possible and in order to implement it four steps were applied: identify the parts that have interactions outside its module, row swap, parts removal and removal of interactions (Steward, 1993).

3.4.1 Parts Identification

As a first step, the parts that had more than one interaction with the same module were evaluated, without taking into account the module to which parts belong. After that, the *ones* that meet the premise above in the interaction matrix were identified (Figure 4). This scheme evidenced which parts should be redesigned to try that each part has at most one interaction with the other modules. In the blender such parts are the Base (18), Female attachment (21), Power cord (24) and Motor side rubber support (29) (Table 2).

Table 2. Parts that interact outside its module more than once

Part number	Part Name	Interacts outside its module with:
18	Blender Base	8 & 11, 37 & 38
21	Coupling Female	30 & 32
24	Power cable	15, 16 & 17
29	Motor Side rubber support	18 & 19

3.4.2 Rows Swap

The second step is where these parts interact more outside its module than within its own module, to make an appropriate exchanges between the matrix rows (and the columns to keep symmetry) and reorganize it so interactions between modules are

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

reduced (Figure 8). For the blender, the Motor side rubber support (29) meets the above; belonging to m5 it has two interactions with m2 and interacts only once within its own module. The first operation that was performed was to remove the Motor side rubber support (29) from m5 and put it in the module m2. To put the rubber supports first onto the base would not allow their assembly. So a change was made in the way of assembling the motor subassembly (32) to the blender base (18) and a change in the physical form of Motor side rubber support (29), (Figure 6). It is important to remember that the modules were chosen for ease of disassembly, thus belonging to a module involves a specific disassembly order. A change in the order may imply disassembly, and therefore assembly in a different way, as occurs in the illustrated case.

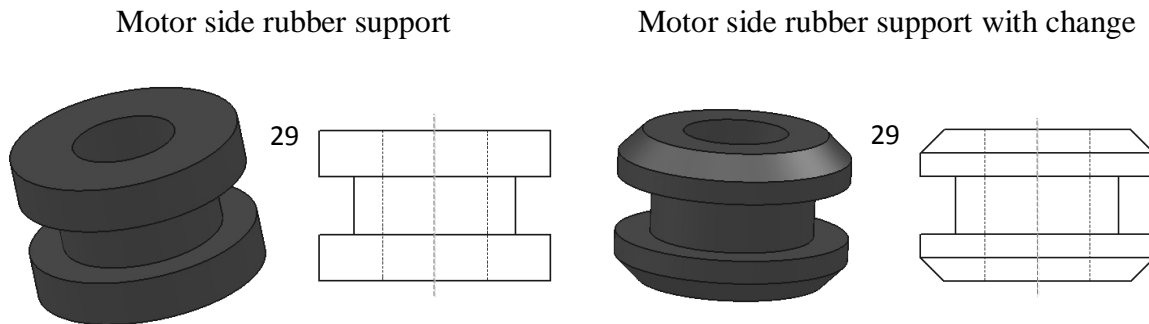


Figure 6. Change made to the Motor side rubber support (29)

3.4.3 Parts Removal

As a third step, the parts that interact more than once out of their module were identified, they can be eliminated or integrated into other parts. Studying the parts of the blender and evaluating them according to their functions and assembly got that two parts can be dispensed with little effect on the functionality of the product. The cable clamps (16) and cable gland screws (17) have the functions of “holding the power cable (24) to the blender base” and “transferring any pull force on the power cable (24) to the base”. To remove these two parts it is necessary to modify the lower base (15), while the power cable (24) is maintained in position (Figure 7). The elimination of these two components produces a reorganization in the matrix of interactions (Figure 8), showing a lower amount of *ones* outside modules, which implies an approach to a more modular product.

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

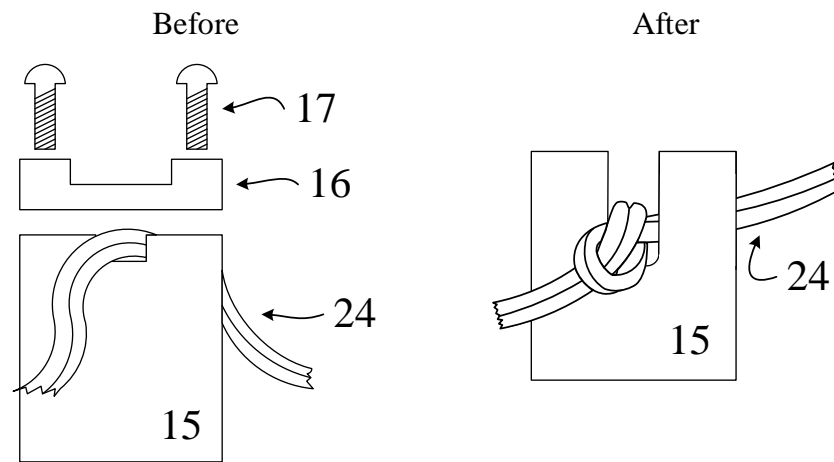


Figure 7. Parts Removal

Power cable (24) and a small portion of the lower base (15). Left side: candidate parts to be eliminated, Cable clamp (16) and cable gland screws (17), Right side: Redesign Proposal in the small part of the lower base (15).

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

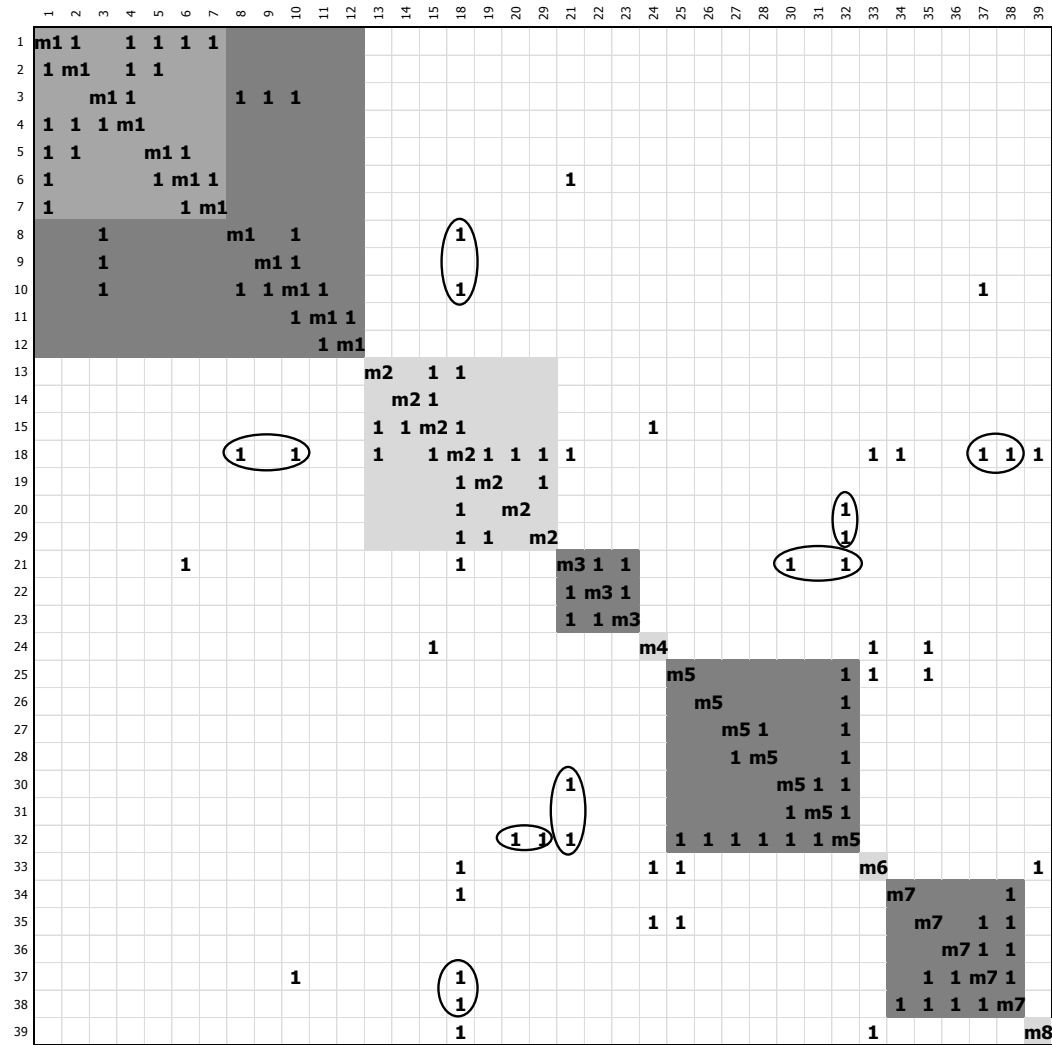


Figure 8. Interactions matrix with changes implemented

3.4.4 Interactions between modules are eliminated.

Finally, based on the modules that interact more than once evidenced in the matrix (Figure 8), we proceeded to eliminate the interactions between modules. It worth remembering that the analysis of the interactions of individual parts was performed previously, in this section account will only be taken of the interactions between the different modules (Table 3). After completing this process a new matrix was built that includes all the modifications performed and that shows an increase in the modularity of

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

the product (Figure 10). It will be described below each of the modifications made in the parts of the blender to decrease the interactions between modules.

Table 3. Interactions between modules specifying the parts involved

Module	Interact more than once	Parts involved
m1	m2	8 and 10 interact with 18
m2	m5	20 and 29 interact with 32
	m7	18 interact with 37 and 38
m3	m5	21 interact with 30 and 32

- To generate a single interaction between m1 and m2, the jar base (8) was modified making it 20 mm higher to eliminate interaction between the jar (10) and the blender base (18). By making this change, the activator for safety of the jar (10) became part of the fastener of the jar base (8). This, in addition to eliminating the interactions between module m1 and m2, facilitated uncovering the jar (10) at the bottom; providing two points to support this action. It must be considered that the jar needs to be 20 mm shorter in order to maintain the overall dimensions of the product (
- Figure 9). Another variation that can be seen after this modification is that the safety switch activator (37) stops interacting with the jar (10) and passes to interact with the holder of the jar base (8), which means that the interface between module m1 and module m2 is simpler. The simplicity of the interactions and the precise definition of these are an essential part to modularize a product, this can be seen in the module definition of Hölttä (Hölttä-Otto, Doctoral Dissertation of Modular Product Platform Design, 2005): “A module is an independent building block of a larger system with a specific function and well-defined interfaces”

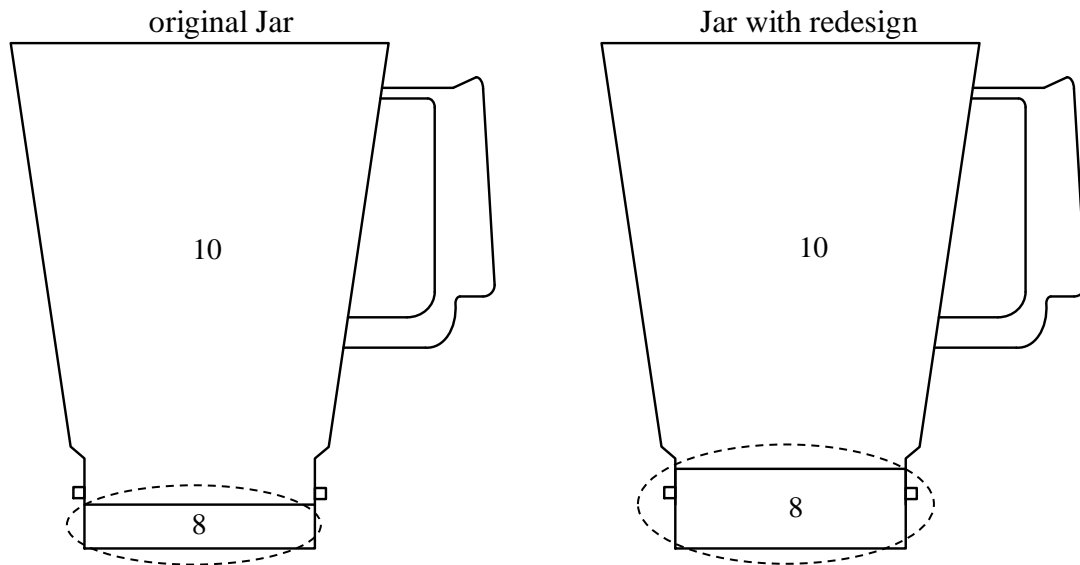


Figure 9. Change made to decrease the interactions between modules.

The Jar base (8) was made higher to eliminate interactions between the jar (10) and the blender base (18).

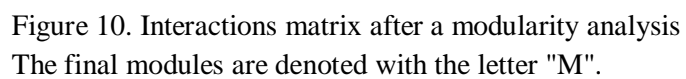
- It was evidenced that the modules m2 and m5 have two interactions; one through the Motor rubber supports (20) and another by the Motor side rubber support (29). The modification made to achieve a single interaction was to unify these supports. Thus, they now being identical parts, it performs two functions and can be ordered equal pairs of supports instead of pairs of different supports. To achieve that the supports fit into the cavity of the blender base (18) the size of the supports is adjusted to make them fit on it. Taking into account that equal parts are taken as if they were a single one, a single interaction between these two modules is obtained, even though there are four contact points among the blender base (18) and the motor subassembly (32) through the supports.
- Since the module m2 and the module m7 also interacted more than once, it was possible to reduce the interactions between these two modules making the blender base (18) not to be the guide of the safety switch activator (37), instead this function will be done by the safety switch base (38), which is its own base.

- Interactions between m3 and m5 involve essential relationships for the operation of the blender, such as coupling female (21) with the packaging motor shaft (30) and the axis of the motor sub assembly (32); therefore it is not possible in this case, to change the product.

After the four steps mentioned were implemented, an analysis of the blender assembly was made, and modules m4, m5, m6 and m7 were combined, as this facilitates the assembly, and a single module was generated comprised of all the electrical parts of the blender. To understand the new matrix of interactions the resulting modules after implementing all changes are denoted with the letter "M". The new modules were composed from the previous ones as follows: m1 became M1; m2 into M2; m3 into M3; m4, m5, m6 and m7 into M4, and m8 into M5 (Figure 10). As the objective was to make the product as modular as possible, in this case it is evident that the base module cannot have a single interaction due to its functionality. This is not the only feature that makes modularity difficult, also is important to keep in mind that a large size module and/or a module with many parts are more difficult to modularize.

After the identification of the parts, the exchanging of rows and removing of parts depending on the interaction matrix, it can be concluded that the implementation of the changes described increased the modularity of the blender by 27.78%. This percentage was calculated by enumerating the eliminated interactions and comparing the number of initial interactions, obtaining a simpler product in which the interactions between modules have decreased (Figure 12). Likewise, the modularity index of singular value (SMI) applied to the interaction matrix before applying modularity (Figure 4) and after (Figure 8), shows that the resulting matrix is more modular as it has an index value 0.167 closer to 1 than the index of the initial matrix (0.154)¹.

¹ The literature shows that the SMI index can be used to measure modularity (Hölttä-Otto & De Weck, 2007), however, this index is highly dependent on the size of the matrix, implying that two arrays of different size cannot be compared, and that as matrices tend to be larger the SMI values will tend towards zero.



DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

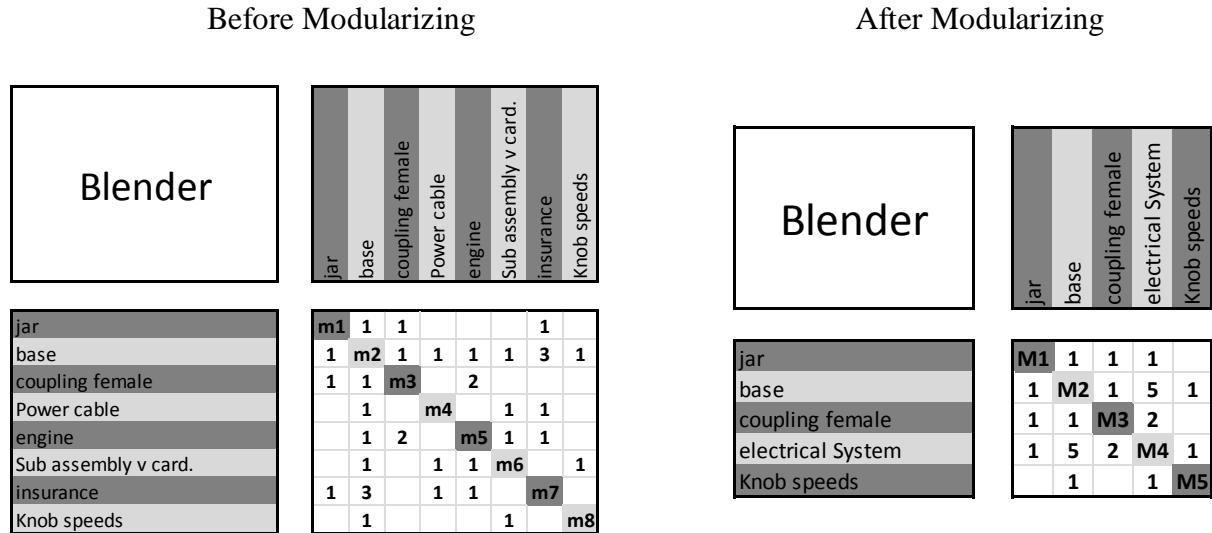


Figure 11. Simplified comparison of the matrices before and after the process of modularizing: The first row and the first column show the names of the modules. The gray boxes in the matrix correspond to the modules. And the numbers of the matrix in white boxes denote the quantity of interactions between modules. To the left it is the matrix before modularization and to the right it is the matrix after modularization.

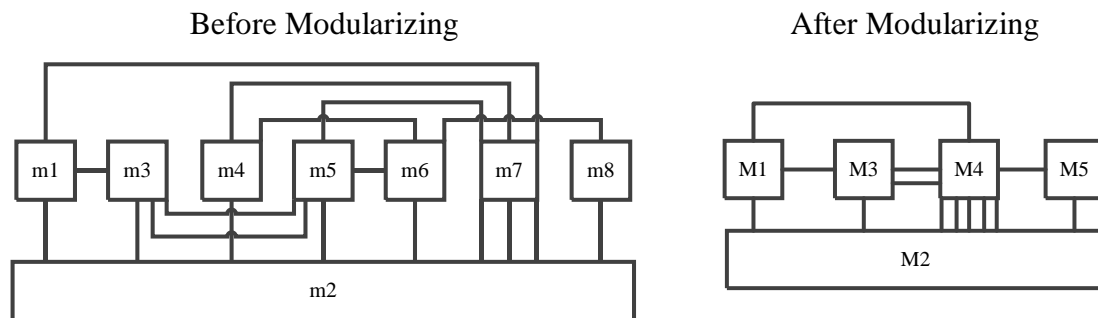


Figure 12. Outline of the manner in which modules interact. The boxes represent the modules and the lines that connect boxes interactions. The left presents the outline before modularizing and the right after modularizing.

3.5 Measurement of assembly times before and after modularization

To validate the changes made to the product the assembly times of the original blender were measured (Table 4), the reductions caused by these changes were estimated, and finally both results were compared in the modules M1, M2 and in the assembly of M4 in M2, since it was in these modules where time reductions occurred.

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

For the measurement of the assembly times, all the elements of the blender were placed near to the work area, obeying to our initial assumption that the parts do not require storage away from this area due to their weight and/or size. Several practice assemblies were made (the time of the last six assemblies (Table 4). was averaged) to approach the times that an operator can reach and then they were compared with those obtained from the process of modularization, times were separated by modules.

In our case study a theoretical calculation of the assembly times was estimated for the whole electrical part based on the theory DFA (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002), and using the experimental time (EXP) presented in the graphs (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002, pp. 160-162) (Table 5). Evaluating the adjustments that were made to make the product more modular, the following results were obtained in the reduction of the assembly time:

Table 4. Initial assembly times of the blender separated by modules

Module	Assembly time (s)
m1	49,07
m2	33,97
m3	20,72
m4	214,60
m5	
m6	
m7	
m8	-
m4 with m2	150,20
m3 with m2M4	40,50
m8 with m4	19,89
Total (s)	528,95

Table 5. Theoretical assembly time for the electrical part of the blender

Operations	Time (s)	# of cables	Total Time (s)
Stripping the cable	7	12	84
weld	9	8	72
Pressing	13,9	4	55,6

Total	211,6
--------------	--------------

3.5.1 First change: eliminating cable clamp (16) and two cable clamp screws (17).

The elimination of these three parts means that the 2 cable clamp screws (17) do not have to be tightened and the cable clamp (16), these implied a reduction 23.63% in time. When performing this change the function of the cable clamp was integrated to the lower base (15), modifying the injection mold to make a parallel-sided slot in a small part of the lower base (15), tying a knot into the power cable (24), and thus be able to hold the cable through it (Figure 7).

3.5.2 Second change: modification of the motor subassembly (32) and change the Motor side rubber support (29) to the base

Modify the motor subassembly (32) and arrange the Motor side rubber support (29) are assembled in the blender base (18) facilitates assembly, reducing it two seconds, a decrease of 5.89% in this operation.

3.5.3 Third change: extension of the walls of the fastener of the jar base (8) and pass of the safety activator of the jar to the same fastener

Make the walls of the bottom cover fastener higher (8) and the pass of the sure activator from the jar to the fastener of the bottom cap involves modifying the injection molds. However, this change makes the assembly of the bottom cover fastener easier (8) to the jar (10) and increases the benefits not only for the operator but also for the user of the blender. This increase in the assembly ease was assessed in a reduction of a second (it decreases 2.04% the assembly time in this operation).

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

3.5.4 Fourth Change: Unification of motor supports

Making the motor supports identical saves time in defining which supports to use and where to put it. This procedure reduces the overall assembly time by three seconds, corresponding to a decrease of 8.83%.

After making the four changes described, a reduction in the assembly time of 8.70% per assembled blender was obtained (Table 6). This means an increase in the production of blenders and of course, an increase in the anticipated sales of the manufacturing enterprise. In other words, if a single operator works eight hours a day there will be an increase of 5 blenders per day, equivalent to an increase of 1820 blenders in a year for each operator.

Table 6. Times reductions and total assembly time for modularized blender

Module	Assembly time (s)	% of decrease by modules
M1	48,07	2,04%
M2	28,97	14,72%
M3	20,72	
M4	214,60	
M5	-	
M4 with M2	110,20	26,63%
M3 with M2M4	40,50	
M5 with M4	19,89	
Total s	482,95	8,70%

Out of the measurement of the assembly times, another form of assessment was used to validate the changes made to our example product. The Indexes of two different methodologies of design for assembly were measured, the design efficiency (Lucas Engineering & Systems Ltd; University of Hull, 1989), and the assembly efficiency (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002). Both indices were calculated for the initial product and the modularized product.

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

The design efficiency is defined as the number of type A parts over the total number of parts, where the number of parts type A are the ones essential to the proper functioning of the product and therefore they are not susceptible to change. These parts were chosen according to the rating questions of parts schematized in Figure 13, which shows a procedure in which these two methods were combine on the same diagram. The questions in the first row are those proposed by Boothroyd *et al* (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002) and the rest were proposed by LUCAS (Lucas Engineering & Systems Ltd; University of Hull, 1989) (Figure 14).

The efficiency of the assembly is determined by the number of parts type A multiplied by three seconds, and divided by the actual assembly time. These three seconds is an average assembly time for a part that has no operating, insertion or fixing problems (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002, p. 94). (Figure 15).

When the indexes for design efficiency (Lucas Engineering & Systems Ltd; University of Hull, 1989) and assembly efficiency (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002) were calculated before and after the modularization of the blender, an increase of 2.79% and 3.80% respectively was noted, which validates the changes made to the product. If the design efficiency was 100%, we would have a product in which all its parts are 100% necessary, and if the assembly efficiency was 100% we would have a product with an optimal assembly process, for this reason any increase in these two indices leads to a more efficient product. It is important to clarify that since the proposed changes are aimed to modularize the product and not to redesign it from an assembly viewpoint, these rates could be increased if DFA (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002) was implemented in each of the modules separately.

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

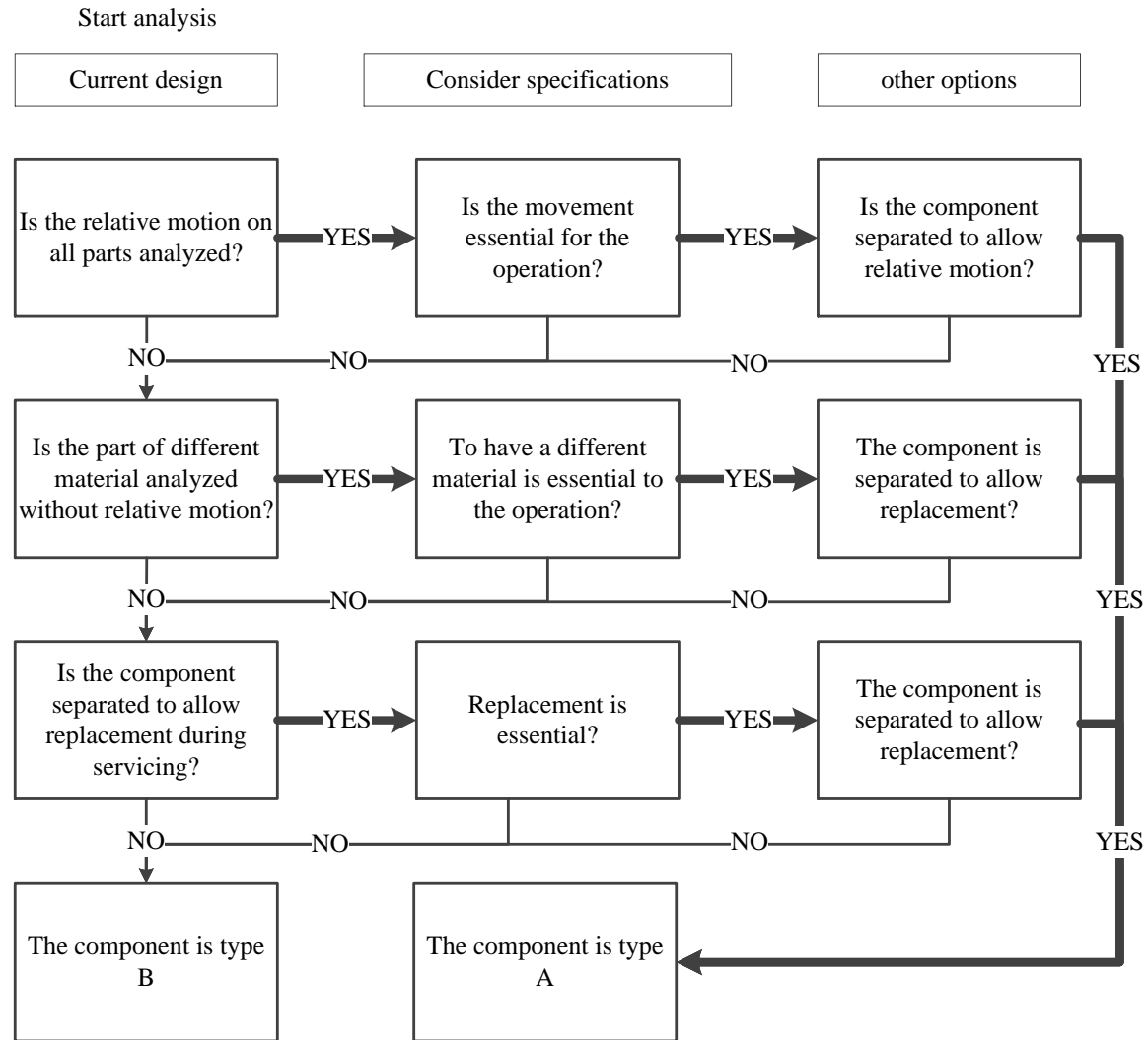


Figure 13. Classification of parts type A

The diagram shows the classification questions of parts type A, obtained by integrating questions from the Boothroyd, Dewhurst and Knight's methodology (Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002) and the Lucas Engineering & Systems Ltd's methodology (Lucas Engineering & Systems Ltd; University of Hull, 1989).

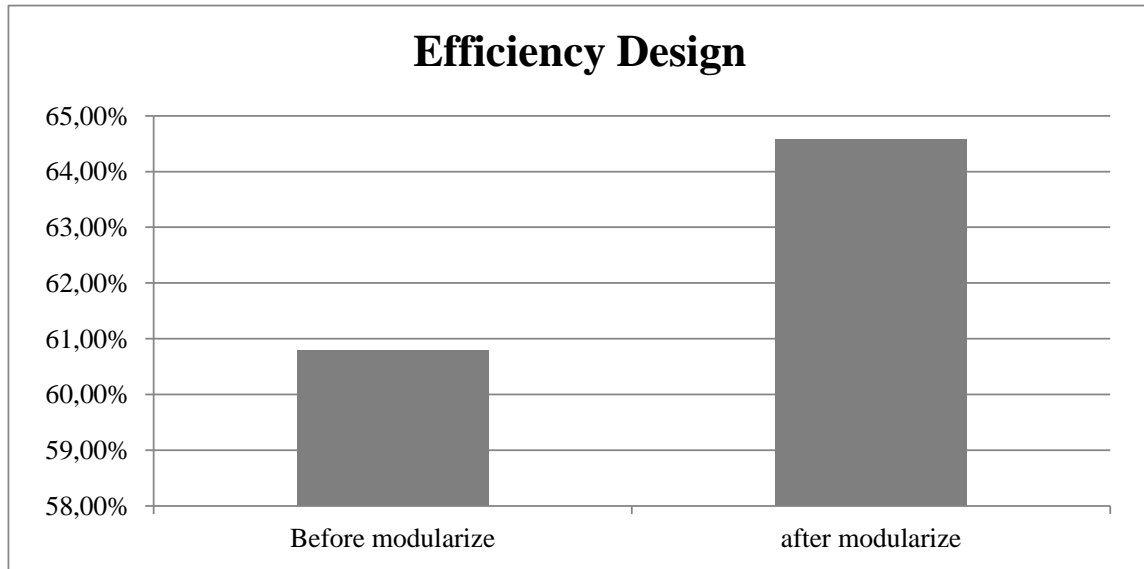


Figure 14. Design efficiency (**Lucas Engineering & Systems Ltd; University of Hull, 1989**) before and after the product modularizing
Shows an increase of 2.79%

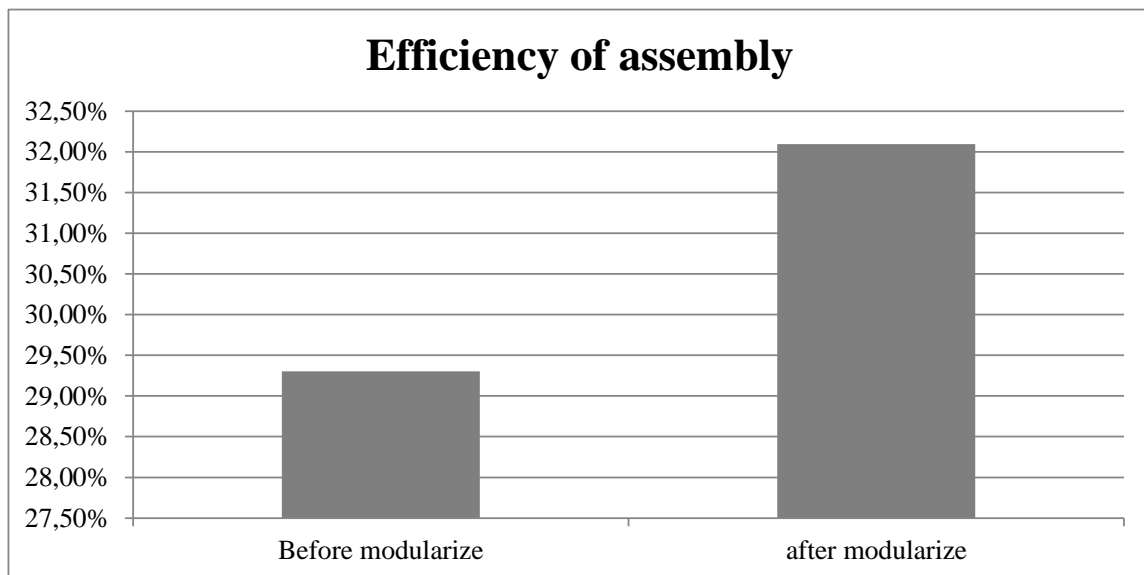


Figure 15. Assembly efficiency (**Boothroyd, Dewhurst, & Knight, 2002**) before and after the product modularize
Shows an increase of 3,8%

In conclusion, changes performed in the blender in function of design for assembly with a modular perspective increased the design efficiency, assembly efficiency and the daily number of blenders produced (Table 7). This means that the implementation of this

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

methodology in the products of a company can increase the profitability mainly by increasing the number of blenders produced. Furthermore, these changes performed from a modular perspective influence the organization of the production plant as evidenced below.




Table 7. Increase in the efficiency of design, increase in the assembly efficiency and increase in the production of blenders.

Increased efficiency of design	2,79%
Increased efficiency of assembly	3,80%
Percentage reduction in assembly time	8,70%

3.6 Operation chart before and after the product modularization

To continue the study and give guidance for plant layout, an operation chart was generated, as proposed by Criollo (García Criollo, 2006). In which the operations necessary to assemble the product were schematized². These diagrams are composed of five main symbols of which only three were used for this investigation, the ones corresponding to operations, storage and transport (Table 8). Operations were taken as the necessary procedures for the product to be assembled, stored as the meeting point where the parts are arranged to achieve the operations, and transported as the action of moving a part from the point of storage to the point where the product is assembled.

Table 8. Symbolism used in the operation chart (García Criollo, 2006, p. 54)

Operation	Description	Symbol
Operation	"Occurs when an object is being changed in its characteristics, it is being created, adding something or it is being prepared for another operation."	
Storage	"Occurs when an object or a group of them are retained and protected for a later use or to not misuse them"	
Transport	"Occurs when an object or a group of them are moved from one place to another except when this movement is part of	

² As a result of using the operation chart, a product can be more modular. Therefore, it is recommended to integrate the operation chart in the modularization process of the product.

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

	another operation"	
--	--------------------	--

To construct the operations diagram, the order in which the blender was assembled was taken into account, meaning that each part begins to be stored, then transported to the place of assembly and finally assembled through an operation which in the case of the blender is to insert, screw and/or bond. To better understand the flowchart scheme, the module jar assembly (m1) is exploded along with the numbering of the operations required to assemble this module (Figure 16, left) the present ovals in each diagram represent operations of the modules discussed above.

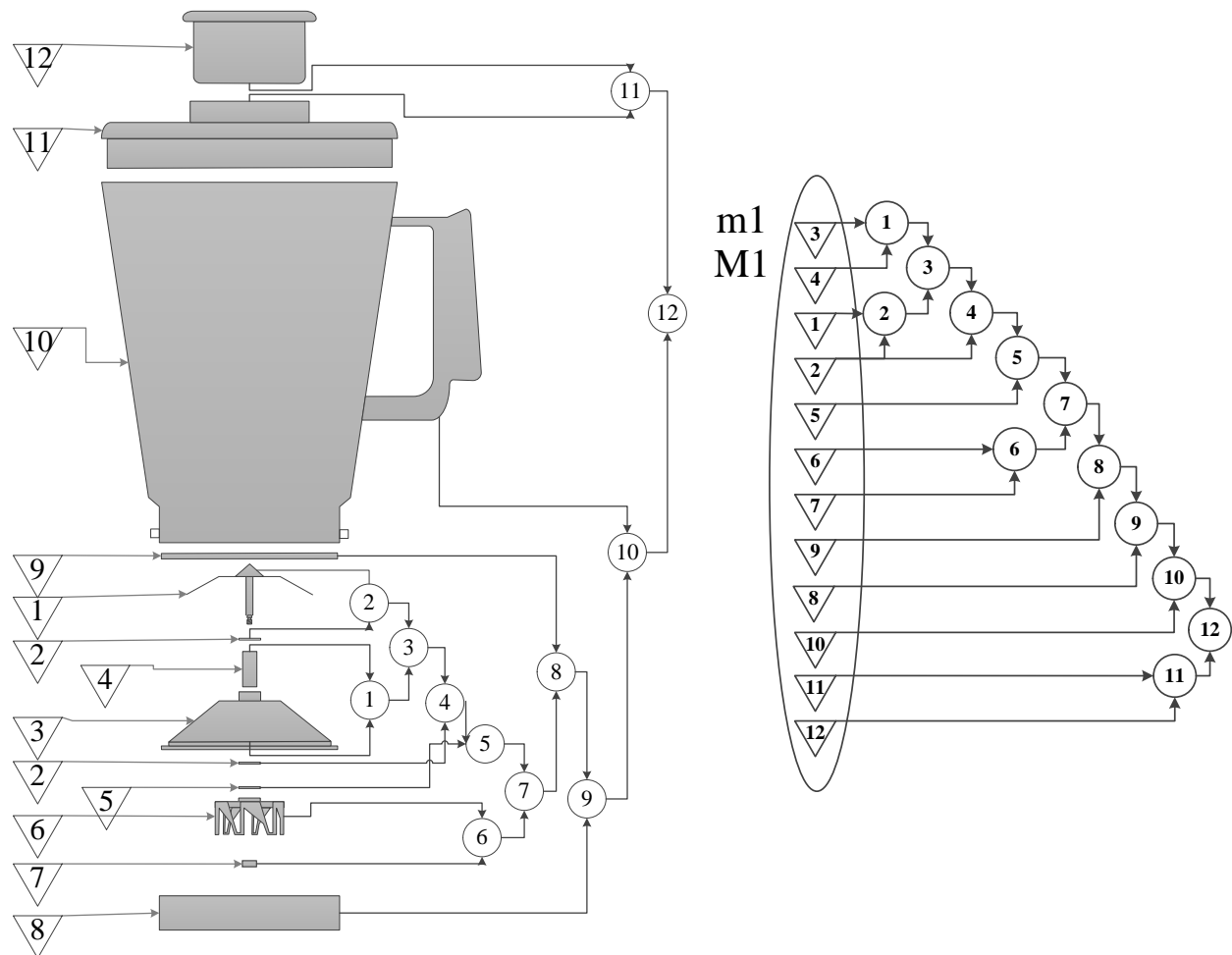


Figure 16. Flow chart for the blender jar. Left side. Scheme of the original jar assembly module (m1) exploded with the operations. Right side. Operations diagram of the redesigned module jar assembly (m1, M1)

The simplicity of the flow chart showed an overview of product assembly and allowed to determine which parts and subassemblies could be assembled simultaneously.

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

Generally, in a production process subassemblies are assembled with pre-assembled subassemblies and usually not individual parts together. For the case of the blender parts 35, 36, 37 and 38 were previously assembled by means of operations 19, 20 and 21 that can run simultaneously with the operations 16, 17 and 18 (Figure 17).

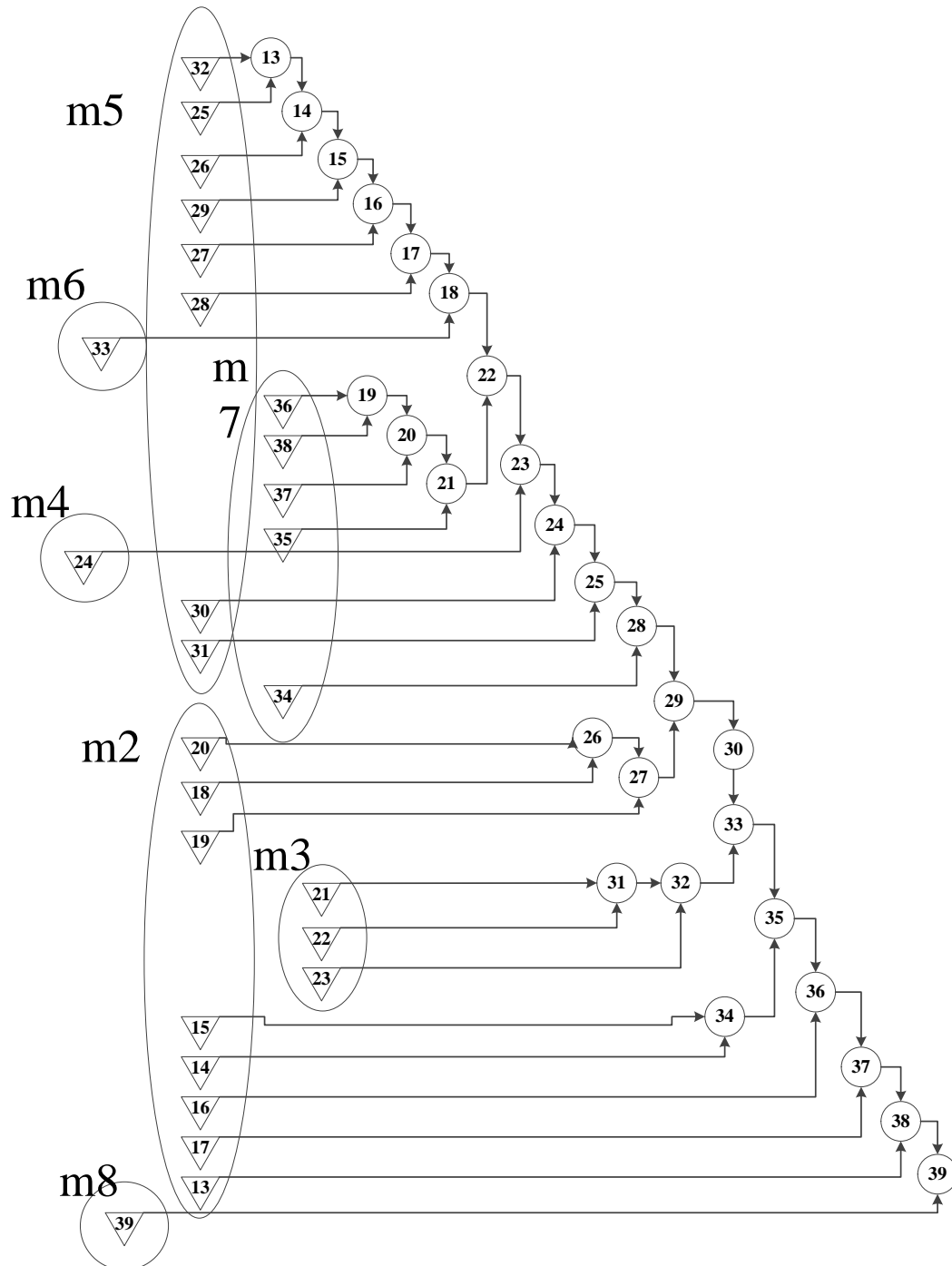


Figure 17. Flow chart of the blender base before modularizing. The flow chart of the blender base before modularizing is presented.

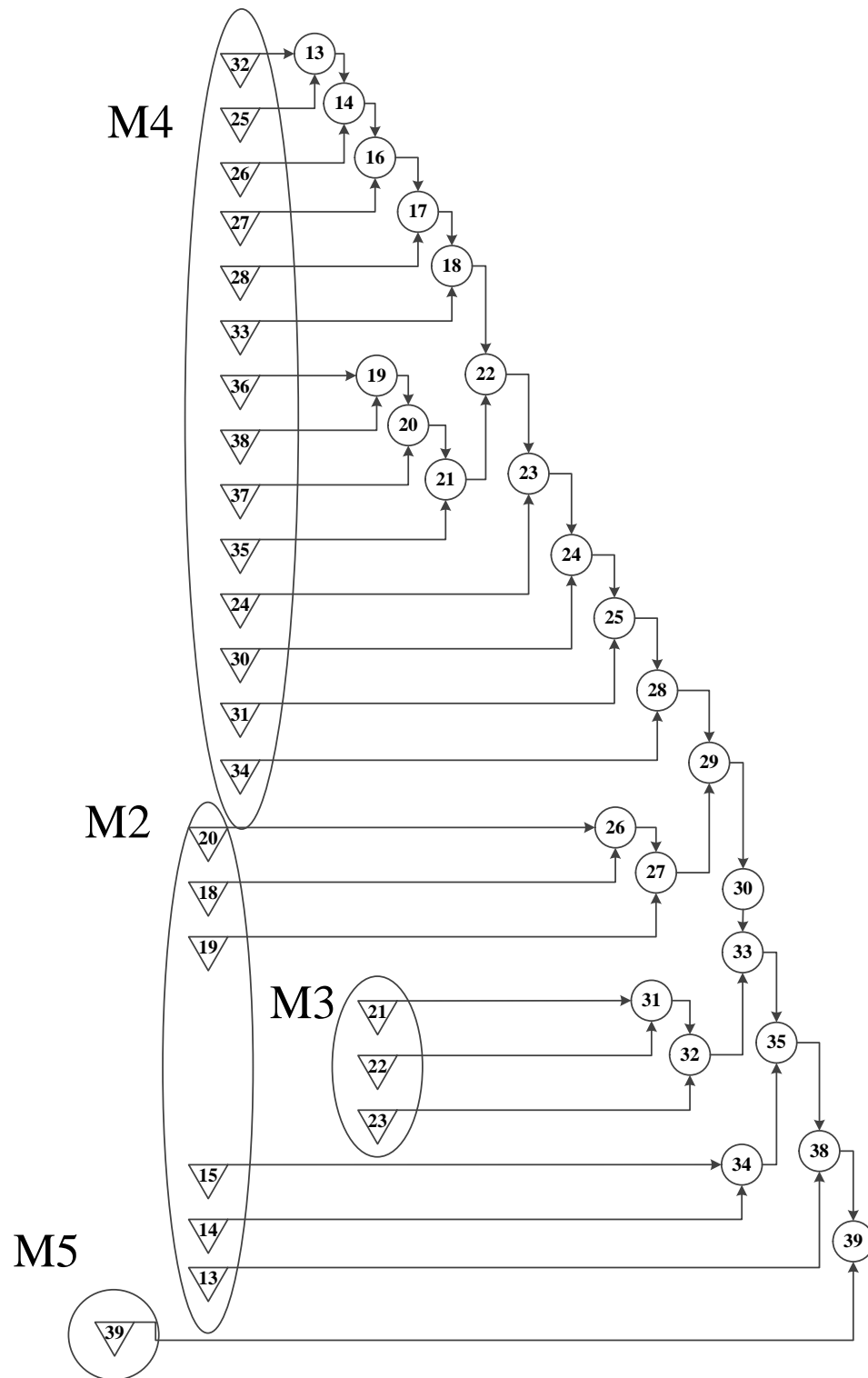


Figure 18. Flow chart of the blender base after modularizing. The flow chart of the blender base after modularizing is presented. The blender jar module (M1) was omitted because after modularizing its flowchart did not change.

As the diagram of operations shows how parts are organized schematically in a sequential order according to the order of assembly operations, it is important to observe how the modules are distributed. Considering that an assembly process is more efficient if modules are assembled separately, which also implies a higher level of modularity (Ericsson & Erixon, 2000), it was shown in the flow chart of the blender base before modularizing that modules were intersecting others in its assembly process, and that they presented operations that did not allow the assembly of modules separately (Figure 17). This is unlike the flow chart after modularizing in which it is clearly outlined that M4 was transformed into a totally independent module.

3.7 Distribution of plant in the assembly process

In the final part of this investigation it was proposed to redistribute the plant, according to the assembly process and the new modules proposed. As a starting point, an initial distribution of plant with two workstations was considered, one to assembly the blender jar and another to assembly the rest of the blender. The proposed distribution of plant was made according to the chosen initial modules. This initial plant distribution produces a total of sixty blenders daily, based on the speed of assembly of the slower workstation; it is the one operating with modules m2 to m8 which takes 479.88 seconds for its assembly (Figure 19, Initial).

By implementing the process of modularization for the blender, we split workstations by modules in order to have "products within the product, small factories within the factory", Ericsson and Erixon (Ericsson & Erixon, 2000, pp. 102-105). With this new distribution of plant the production rate increased by 116.67%. Since the slower workstation, which in this case is that corresponding to M2, M3 and M5, is 259.60 seconds faster than the slowest module in the initial distribution (Figure 19, 1).

The modular design and specifically the newly defined modules in the product, allowed different plant layouts to select the best option, efficiently assemble more blenders and achieve an increase in productivity. For example, a formation of four operators where modules M2, M3 and M4 are assembly only by two of them, will allow

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

an increase of 123% compared to the initial distribution (Figure 19, 2). This configuration could be optimized through maximizing the working time of the workers. If the operator of the faster module, which in this case is M1, assists in the assembly of M4 after finishing the assembly of 217 blender jars, this would increase the number of blenders to 217. Expressed in working hours, working for three hours in the formation 2 and for 5 hours and in the formation 3, an increase of 262 % in daily production of blenders (Figure 19, 3) would be implemented. This shows that the modular redesign has high implications for optimizing the assembly time, the use of the work area, the elimination of rework, the flexibility of the company and therefore the productivity of a company.

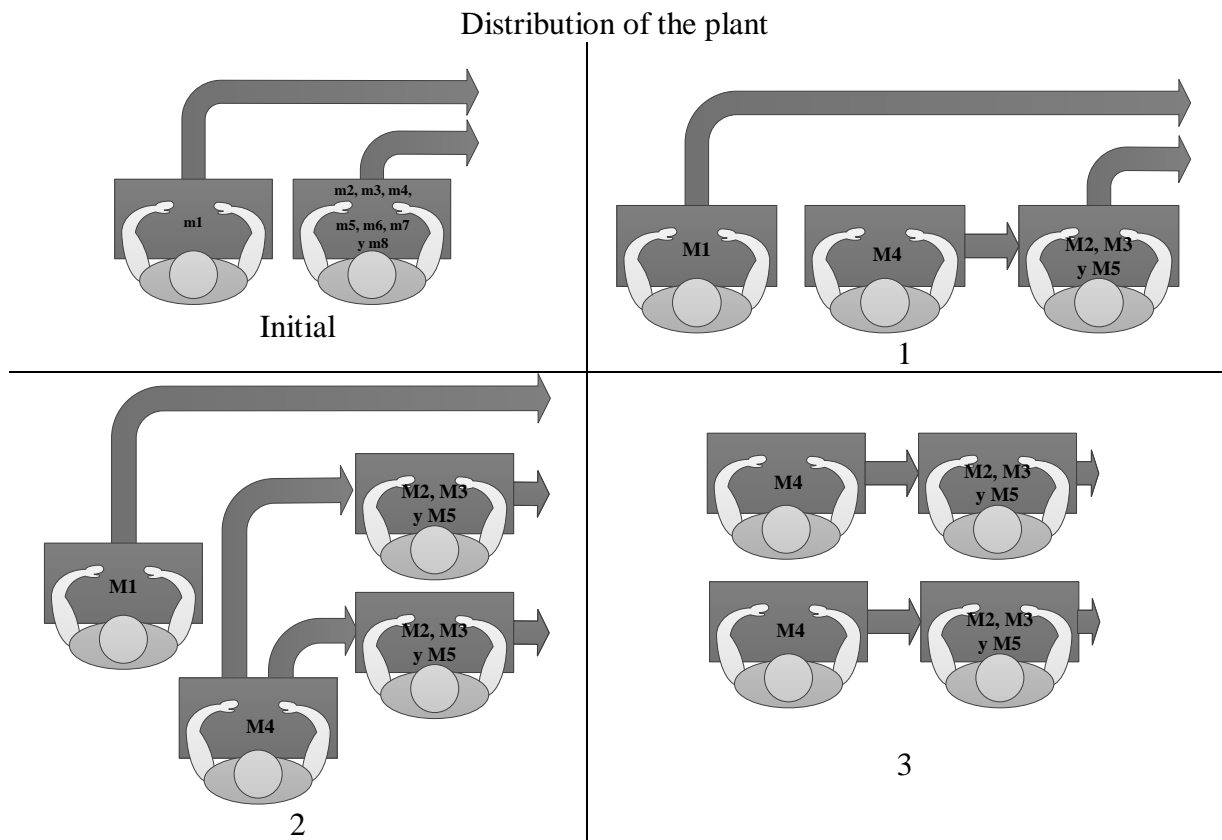


Figure 19. Layout of plant before and after the process of modularization

After making a modular analysis of a product, other layouts of plant can be proposed that allow a further increase in the production of that product, in this case blenders.

4. CONCLUSIONS

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

This research proposed using procedures based on tools that are normally used for designing and were adapted for redesigning of products, specifically to work based on principles of modularity, since the existence of methodologies to work in redesigning products is scarce in literature. It was shown how the adaptation of these tools in existing product can generate changes in the layout of plant, facilitating organization in the areas of assembly, increasing flexibility and increasing production levels of a company. In addition, the methodology can help to implement a modular platform in cases where a company has different products.

By applying the method to a blender, an increase in modularity of 39.13% was obtained, a reduction in assembly times (8.70 % by blender), an increase in the efficiency of design and an efficiency of assembly (79% and 3.80% respectively), with the new plant layout according to the modules obtained the production of blenders was increased by 116.67%, and finally by using the modules to their maximization with four operators production increases by 262%.

Given the established modules various formations in the distribution of plant may be considered and chosen according to the number of operators, the displacement time, modules assembly time, among other important variables, which best suits the needs of the company .

In this research a modularization methodology that is easy to implement on any product is proposed, because it allows analysis of the product abstractly with the interaction matrix and functional analysis, and tangibly with DFA, to permit a decrease in assembly time and manufacturing costs, and increasing production. Thus the plant becomes more flexible and this helps to improve the processes. It is a methodology that enable to retrace the steps already taken in order to make the product that is being studied progressively more modular, which then allows another type of analysis on each of the modules, such as design for quality, design for assembly, and design for robustness among other designs for X (DFX) that exist.

ACKNOWLEDGEMENTS

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

This work could not have been completed without the contribution of Professor Ernest W. Eder, his rewarding visit in 2013 and his meaningful lessons.

REFERENCES

- Hölttä-Otto, K. (2005, agosto 12). Doctoral Dissertation of Modular Product Platform Design. *Modular Product Platform Design*. Helsinki: University of Technology, Laboratory of Machine Design.
- Boothroyd, G., Dewhurst, P., & Knight, W. (2002). *Product design for manufacture and Assembly* (2 ed.). Boca Raton: CRC Taylor & Francis.
- Daniilidis, C., Enßlin, V., Katharina, E., & Lindemann, U. (2011). A classification framework for product modularization methods. *International conference on engineering design, ICED11*.
- Eder, W., & Hosnedl, S. (2008). *Introduction to Design Engineering*. Boca Raton: CRC Press.
- Eder, W., & Hosnedl, S. (2010). *Introduction to design Engineering: Systematic Creativity and Managment*. Leiden, Netherlands: CRC Press/Balkema.
- Ericsson, A., & Erixon, G. (2000). *Controlling Design Variants: Modular Product Platforms* (1 ed.). Michigan: Society of Manufacturing Engineers.
- Erixon, G. (1996). *Design for x* (1 ed.). (G. Q. Huang, Ed.) London: Chapman & Hall.
- García Criollo, R. (2006). *Study of work: engineering methods and measurement of work* (7 ed.). México: McGraw-Hill.
- Gupta, G. E. (2013). Analysis of modularity implementation methods from an assembly and variety viewpoints. *Int J Adv Manuf Technol*, 66, 1959-1976.
- Hölttä, K., Suk Suh, E., & De Weck, O. (2005). Tradeoff between modularity and performance for engineered systems and products. Melbourne.
- Hölttä-Otto, K., & De Weck, O. (2007). Degree of Modularity in Engineering Systems and Products with Technical and Business Constraints. *CONCURRENT ENGINEERING: Research and Applications*, 15, 113-126.
- Huang, C.-C., & Kusiak, A. (1998). Modularity in Design of Products and Systems. *IEEE, Transactions on systems, man, and cybernetics.*, 28, 66-77.
- Hubka, V., & Eder, W. (1988). *Theory of Technical System: A total Concep Theory for Engineering Design* (2 ed.). (V. Hubka, Trans.) New York: Springer-Verlag.
- Hubka, V., & Eder, W. (1996). *Design Science: Introduction to the Needs, Scope and Organization of Engineering Design Knowledge*. London: Springer-Verlag.

DESIGN FOR MODULARITY AND PLANT LAYOUT

Lucas Engineering & Systems Ltd; University of Hull. (1989). *Design for Assembly Practitioners Manual* (5 ed.). Hull: University of Hull.

Nonaka, I. (2000). The knowledge-creating company. *Harvard Business Review*, 69, 96-104.

Otto, K., & Wood, K. (2001). *Product design: Techniques in Reverse Engineering and New Product Development* (1 ed.). New Jersey: Prentice Hall.

Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., & Grote, K. H. (2007). *Engineering Design: A Systematic Approach* (3 ed.). London: Springer.

Pedroza Zapata, A. R., & Ortiz Cantú, S. (2008). TECHNOLOGY'S STRATEGIC MANAGEMENT IN THE PRE-DEVELOPMENT OF NEW PRODUCTS. *Journal of Technology Management & Innovation*, 3, 100-111.

Steward, D. V. (1993). *Using the design structure method*. California State University, Computer Sciences Department. Washington, DC: NSF Report.

Ulrich, K. T., & Eppinger, S. (2012). *Product design and development* (5 ed.). New York: MC Graw Hill.

Vokurka, R. J., & O'Leary-Kelly, S. W. (2000). A review of empirical research on manufacturing flexibility. *Journal of Operations Management*, 18, 485-501.